

G

G
70.45
US
L47
2013

Département de géomatique appliquée
Faculté des lettres et sciences humaines
Université de Sherbrooke

GMQ-804 — Mémoire

**Modélisation et cartographie des propriétés de la fibre de bois, à partir de données
environnementales et d'inventaire forestier : cas de la forêt boréale à Terre-Neuve.**

Émilie Lessard

1982-

Maîtrise en sciences géographiques
cheminement: Géomatique

Directeur :
Richard Fournier
Co-directrice :
Joan Luther

© Octobre 2013

Directeur de recherche : Richard Fournier
Codirectrice de recherche : Joan Luther
(Service Canadien des Forêts, Ressources naturelles Canada)

Membres du jury :
Alexandre Langlois (Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke)
Guillaume Giroud (Ministère des Ressources naturelles du Québec)

Résumé

L'industrie forestière cherche à mieux identifier la qualité de la fibre de bois des peuplements forestiers afin d'améliorer la planification et la gestion des opérations forestières, des étapes de planification jusqu'à la distribution, en passant par les opérations de récolte. Pour se faire, une meilleure compréhension des relations qui unissent les attributs de la fibre de bois et les variables environnementales est proposée. Cette étude vise à quantifier ces relations, à l'échelle de la placette, afin de développer des modèles prédictifs pour l'île de Terre-Neuve. Les attributs de fibre de bois ont été mesurés grâce à l'analyse de carottes de bois de dix arbres par placette par la procédure *SilviScan*TM (FPIInnovations, Vancouver) dans 77 placettes dominées par le *Picea mariana* (épinette noire) et 117 dominées par l'*Abies balsamea* (sapin baumier). Les placettes ont été sélectionnées pour représenter la gamme de gradients structuraux des peuplements forestiers présents à Terre-Neuve sur la base de la composition des espèces, la taille, densité de la couronne et les classes de qualité de site. Ce mémoire expose les méthodes et résultats de la modélisation liant les variables environnementales avec neuf attributs de fibre de bois (densité du bois, masse linéique, longueur des fibres de bois, module d'élasticité, angle des microfibrilles, épaisseur de la paroi des cellules, surface spécifique et périmètre de la cellule). Les variables environnementales comprennent des données d'inventaire forestier, des interpolations spatiales pour les données climatiques, et des variables géographiques. L'inférence multimodèle a été utilisée pour prédire les différents attributs de la fibre, à partir de modèles sélectionnés selon le critère d'information d'Akaike parmi un ensemble de modèles candidats.

Des coefficients de corrélation variant de 0,25 à 0,63 ont été trouvés dans les différents modèles d'attributs de la fibre de bois. Une procédure de validation croisée a été utilisée pour valider les résultats de l'inférence multimodèle. Les erreurs quadratiques moyennes obtenues sont, de manière générale, assez proches de la valeur moyenne des attributs (< 10 %). La variable de l'âge et celle de l'éclaircie précommerciale ont été identifiées comme étant des variables d'influence. La modélisation des attributs de la fibre a permis une cartographie de la distribution spatiale pour l'île de Terre-Neuve. Les résultats présentés dans ce mémoire rencontrent les objectifs de modélisation prédictive des attributs de la fibre du bois au niveau du paysage à l'aide des variables environnementales et climatiques.

Mots clés : Analyse spatiale, critère d'information d'Akaike, fibre de bois, inférence multimodèle

Table des matières

Résumé	i
Table des matières	ii
Liste des figures.....	iv
Liste des tableaux	iv
Liste des annexes	v
Avant-propos	vi
Remerciements	vii
1 Introduction	8
1.1 Contexte du projet de recherche	8
1.2 Problématique.....	8
1.3 État des connaissances	11
1.3.1 Attributs de la fibre de bois	11
1.3.2 Modélisation.....	14
1.4 Objectifs	17
1.5 Hypothèses	18
2 Matériel et méthodes	20
2.1 Zone à l'étude.....	20
2.2 Schéma méthodologique	21
2.3 Collecte de données.....	23
2.3.1 Attributs de la fibre de bois	23
2.3.2 Données d'inventaire forestier	26
2.3.3 Données climatiques	27
2.4 Choix de la méthode.....	28
2.4.1 Exploration des données.....	28
2.4.2 Sélection de modèles et inférence multimodèle	30
2.4.3 Spatialisation	31
2.5 Résultats attendus	32
3 Modélisation prédictive de quatre attributs de la fibre de bois à Terre-Neuve	34
3.1 Introduction	36
3.2 Methods	38
3.2.1 Study site	38
3.2.2 Plot-level data.....	39
3.2.3 Landscape-level data	42
3.3 Statistical analyses.....	42

3.3.1	Plot-level modeling	42
3.3.2	Model validation	45
3.3.3	Landscape-level modeling and mapping	45
3.4	Results	48
3.4.1	Plot-level model selection and inference	48
3.4.2	Landscape-level model selection and inference	53
3.5	Discussion	56
3.6	Conclusion	58
4	Résultats complémentaires	65
4.1	Analyse des attributs de fibres supplémentaires	65
4.1.1	Angle des microfibrilles	68
4.1.2	Épaisseur de la paroi des cellules	69
4.1.3	Surface spécifique	70
4.1.4	Périmètre de la cellule	71
4.2	Modélisation au niveau cartographique du paysage	72
5	Discussion générale	77
6	Conclusion	83
	Références supplémentaires	85
	Annexes	88

Liste des figures

Figure 1 - Schéma méthodologique.....	22
Figure 2 - Placette d'échantillonnage permanent (PSP-Permanent sample plot)	24
Figure 3 - Angle des microfibrilles (MacDonald et Hubert, 2002 (tiré de Dickson and Walker 1997))	25
Figure 4 - Principe de parcimonie (Posada, 2004)	31
Figure 5 - Core sampled plots and forested area across Newfoundland, Canada.	39
Figure 6 - Observed vs. predicted values for all fibre attributes (from plot level model averaging).	50
Figure 7 - Predicted spatial distribution of fibre attributes across Newfoundland for stands containing black spruce and balsam fir.	55
Figure 8 - Valeurs observées vs prédites pour les attributs de la fibre de bois (inférence multimodèle à l'échelle de la placette)	68
Figure 9 - Valeurs observées vs prédites pour les attributs de la fibre de bois (inférence multimodèle à l'échelle du paysage)	75

Liste des tableaux

Tableau 1 - Liste des attributs de la fibre de bois.....	10
Tableau 2 – Liste des méthodes statistiques, leurs avantages et inconvénients principaux	17
Tableau 3 - Statistiques descriptives de l'épinette noire.....	29
Tableau 4 - Statistiques descriptives du sapin baumier.....	30
Table 5 - Descriptive statistics of wood fibre attributes for black spruce and balsam fir field plots.	41
Table 6 - List of candidate plot and landscape level models applicable to both black spruce and balsam fir dominated stands.	47
Table 7 - Pearson's correlation among fibre attributes estimated at the plot level for black spruce and balsam fir.	47
Table 8 - Confidence set (95%) ¹ for the plot level models with the highest AICc weights.....	48
Table 9 - Explanatory variables influencing plot-level fibre attributes in Newfoundland (i.e., 95% CI excludes 0). The explanatory variables are in decreasing order of predictive capability. Values in parentheses under the unconditional SE are the ratio between SE and the model-average estimates.....	52
Table 10 - Confidence set (95%) for the best fibre attributes models for black spruce and balsam fir (landscape level).	54
Tableau 11 - Ensembles de confiance pour les attributs de fibre de bois de l'épinette noire (placette)	66
Tableau 12 - Ensembles de confiance pour les attributs de fibre de bois du sapin baumier (placette)	67

Tableau 13 - Importance des variables explicatives pour la prédiction de l'angle des microfibrilles (placette)	69
Tableau 14 - Importance des variables explicatives pour la prédiction de l'épaisseur de la paroi des cellules (placette)	70
Tableau 15 - Importance des variables explicatives pour la prédiction de la surface spécifique (placette)	71
Tableau 16 - Importance des variables explicatives pour la prédiction du périmètre de la cellule (placette)	72
Tableau 17 - Ensembles de confiance pour les attributs de fibre de bois de l'épinette noire (paysage)	73
Tableau 18 - Ensembles de confiance pour les attributs de fibre de bois du sapin baumier (paysage)	74
Tableau 19 - Importance des variables explicatives pour la prédiction de l'angle des microfibrilles (paysage)	76

Liste des annexes

Annexe 1 – Taille des placettes d'échantillonnage permanente	88
Annexe 2 – Liste des variables d'inventaire forestier	89
Annexe 3 – Liste des variables climatiques	90
Annexe 4 – Corrélations de Pearson	91
A) Variables environnementales pour l'épinette noire et le sapin baumier	91
B) Attributs de la fibre de bois pour l'épinette noire et le sapin baumier	92
Annexe 5 – Coefficients des modèles sélectionnés	93
A) Échelle de la placette	93
B) Échelle du paysage	94
Annexe 6 – Graphiques diagnostiques	95
Annexe 7 – Valeurs observées vs prédites pour les attributs de la fibre de bois (inférence multimodèle à l'échelle du paysage)	100
Annexe 8 – Importance des variables explicatives pour les attributs présentés au chapitre 3 (échelle du paysage)	102
Annexe 9 – Résumé de la présentation orale faite lors du Carrefour Forêt Innovations	103

Avant-propos

Ce projet de maîtrise s'intègre à un projet plus vaste qui vise à augmenter la compétitivité de l'industrie forestière de Terre-Neuve.

Le projet prend ses racines d'une initiative du Centre canadien sur la fibre de bois (CCFB) et du Fonds d'innovation de l'Atlantique (FIA) et réalisé en collaboration avec le Service canadien des forêts (SCF), division de l'Atlantique (une division de Ressources naturelles Canada). Il est également réalisé en collaboration avec divers organismes dont : le gouvernement de Terre-Neuve-et-Labrador, Kruger (Corner Brook Pulp and Paper) et FPIInnovations : un partenariat public-privé d'envergure régionale, créé suite à des recommandations émises par le Conseil canadien de l'innovation forestière. Le but étant d'améliorer les connaissances liées aux attributs de la fibre de bois et des facteurs susceptibles de les influencer, et ce, à partir de données déjà disponibles.

La formule d'un mémoire par article a été retenue afin de répondre aux attentes de différents partenaires et de favoriser la diffusion des résultats. Les co-auteurs de cet article sont : Richard Fournier, Joan Luther, Marc Mazerolle et Olivier van Lier.

Remerciements

J'aimerais tout d'abord profiter de l'occasion pour remercier le professeur Richard Fournier et ma co-directrice Joan Luther (chercheuse au Service Canadien des Forêts) de m'avoir proposé ce projet et pour toute l'aide et l'encouragement apporté durant la réalisation de cette maîtrise. Pour leur aide et les réponses aux multiples questions et requêtes, j'aimerais également remercier Marc Mazerolle, pour le volet statistique, et Olivier Van Lier, pour les volets cartographie et base de données.

Le projet n'aurait pas été concrétisé sans l'apport financier et le support au niveau de la recherche du « Newfoundland Fibre Project », incluant l'appui financier du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG-CRDPI-390394) et du partenaire privé Kruger (Corner Brook Pulp & Paper). Les attributs de la fibre de bois ont été fournis par FPInnovations dans le cadre du « Forest Industry Competitive Advantage Project » dirigé par la « Corner Brook Pulp and Paper Limited ». La collaboration active de tous les membres du projet a été très appréciée : Tim Moulton (Corner Brook Pulp and Paper Limited) et Wade Bowers (Grenfell Campus, Memorial University). Merci à Dan McKenney (Ressources Naturelles Canada) pour avoir fourni les données climatiques pour les placettes, ainsi que les grilles climatiques pour l'ensemble de l'île de Terre-Neuve et Boyd Pittman (Département des Ressources Naturelles, Gouvernement de Terre-Neuve et Labrador) pour avoir fourni les données d'inventaire forestier des placettes d'échantillonnage permanente et les cartes forestières des peuplements.

Finalement, au niveau personnel, je tiens à dédier ce mémoire à mon père, décédé en 2011, et qui est pour moi une inspiration. Je voudrais remercier Godefroy, pour sa patience et son soutien de tous les instants. Je désire aussi remercier ma mère, toujours présente.

1 Introduction

1.1 Contexte du projet de recherche

L'augmentation de la compétitivité de l'industrie forestière passe par une meilleure connaissance des liens qui unissent les caractéristiques du bois (densité, élasticité, longueur des fibres, etc.) et les variables environnementales (données d'inventaire forestier, géographiques et données climatiques) qui les influencent. Les attributs de la fibre de bois sont des indicateurs reconnus de la qualité du bois et par le fait même de ses possibles utilisations. Ce projet de maîtrise vise à quantifier les relations pouvant exister entre les propriétés de la fibre du bois et les variables environnementales d'influence au niveau du paysage; et à mettre en place des modèles utilisant les données d'inventaire forestier et climatiques. Il est donc supposé, *a priori*, qu'une relation empirique existe permettant de prédire les attributs de la fibre de bois sur le territoire de Terre-Neuve.

Tout d'abord, une revue de la littérature a permis de relever différents travaux réalisés avec des thématiques de recherche similaires et les problématiques qui y sont associées. Ces travaux sont exposés et décrits de manière plus détaillée dans le chapitre 3. Par la suite, la définition des hypothèses et objectifs est présentée constituant l'axe de recherche structurant ce mémoire. Puis, viennent la description du site d'étude de même que le choix des méthodes utilisées afin de tester les hypothèses. Le manuscrit (chapitre 3) fait état de façon assez précise des principaux outils et méthodes utilisés pour la cueillette et l'analyse des données. Ce manuscrit traite de l'analyse de modélisation pour lier les quatre attributs de la fibre de bois les plus importants aux variables géographiques, de végétation et climatiques. Par la suite, les résultats supplémentaires, traitant des quatre autres attributs de fibres, sont décrits plus en détail dans le mémoire pour permettre de compléter l'analyse de la base de données. Le mémoire se termine par une discussion générale et une conclusion couvrant l'ensemble des attributs de fibre étudiés.

1.2 Problématique

La nécessité d'un tel projet de recherche vient du fait que l'industrie forestière canadienne et terre-neuvienne traverse une période difficile, principalement en lien avec le contexte économique mondial, avec une concurrence internationale importante et une diminution globale de la

demande pour les produits de pâtes et papiers. Afin de faire face à cette situation, des restructurations majeures au niveau de la gestion et des façons de procéder sont mises de l'avant, et ce, des étapes de planification jusqu'à la distribution des produits. Étant traditionnellement orientée vers un marché de volume, essentiellement pour les pâtes et papiers, l'industrie forestière de Terre-Neuve doit se tourner vers de nouveaux marchés, dont celui des produits à valeur ajoutée, afin de maintenir sa compétitivité à l'échelle internationale. Pour ce faire, il faut tout d'abord comprendre quels sont les attributs de la fibre de bois qui confèrent au bois sa qualité, en l'occurrence l'épinette noire (*Picea mariana*) et le sapin baumier (*Abies balsamea*), qui sont les deux essences commerciales principales à Terre-Neuve. Par la suite, il est important de savoir quelles sont les variables environnementales qui influencent cette qualité et à quel endroit sur le territoire se retrouvent ces caractéristiques. Il est coûteux de recueillir ce genre de données pour l'ensemble de la province, en partie à cause de la superficie et du réseau routier limité. Le recours à des méthodes de modélisation utilisant des données existantes devient donc une alternative intéressante afin d'estimer les attributs de la fibre de bois.

L'intérêt de l'étude est de connaître quelles sont les variables structurelles et environnementales qui influencent les attributs de la fibre de bois. Ces attributs, qui sont liés à la qualité des produits forestiers ainsi qu'aux diverses utilisations possibles du bois, sont assez bien connus et documentés dans la littérature. De manière générale, les facteurs externes ont une influence sur le développement des cellules du bois, ce qui influence directement les différents attributs de la fibre (MacDonald et Hubert, 2002; Vaganov *et al.*, 2006). Parmi les principaux attributs d'importance (d'un point de vue opérationnel) se retrouvent : la densité du bois, la masse linéique, la longueur des fibres et le module d'élasticité. Par ailleurs, d'autres attributs ont également été identifiés comme étant importants en terme de qualité du bois et de qualité de la pulpe de bois. Il s'agit de l'angle des microfibrilles, l'épaisseur des parois de la cellule, la surface spécifique et le périmètre de la cellule (Schimleck et Evans, 2004; Sherson *et al.*, 2007; Vaganov *et al.*, 2006; Van Leeuwen *et al.*, 2011) (tableau 1).

Tableau 1 - Liste des attributs de la fibre de bois

Attribut de la fibre de bois	Unité	Description
Densité du bois	kg/m ³	Représente la proportion du bois constitué de tissus ligneux par rapport à l'espace à l'intérieur de la paroi des cellules.
Masse linéique	µg/m	Représente un ratio masse/longueur.
Longueur des fibres	mm	La longueur des fibres du bois.
Module d'élasticité	GPa	Un indicateur de la rigidité du bois.
Angle des microfibrilles	deg.	L'angle des microfibrilles de la cellulose par rapport à l'axe le plus long des cellules individuelles du bois.
Épaisseur des parois de la cellule	µm	L'épaisseur de la paroi des cellules du bois.
Surface spécifique	m ² /kg	Représente un ratio surface/volume.
Périmètre de la cellule	µm	Le périmètre de la cellule du bois.

Source : Amiri *et al.*, 2004; Jang et Seth, 1998; Lei *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2007; MacDonald et Hubert, 2002; Sherson *et al.*, 2007; Swenson et Enquist, 2007; Van Leeuwen *et al.*, 2011; Watson *et al.*, 2003; Wimmer *et al.*, 2002

Les études concernant le sapin baumier sont assez peu fréquentes contrairement à d'autres espèces de conifères, par exemple : le pin de Monterey (*Pinus radiata*) (Watt *et al.*, 2008), le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) (Kilpeläinen *et al.*, 2005) et l'épinette de Sitka (*Picea sitchensis*) (MacDonald et Hubert, 2002). L'impact de certaines variables a été étudié, comme ce fut le cas pour le nombre d'arbres par hectares, le type de fertilisation, les pratiques sylvicoles, etc. (Lei *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2007; Watt *et al.*, 2008a). Toutefois, ces études sont presque exclusivement tirées de sites de plantations et non de site en milieu naturel. Cependant, ces travaux fournissent des pistes intéressantes à explorer dans le but de développer un modèle prédictif des attributs de fibre de bois en milieu naturel.

Puisque les études mentionnées précédemment ne tiennent généralement pas compte simultanément de variables d'inventaire forestier et environnementales, cela n'a pas permis de dégager une relation générale unissant les attributs d'influence et la qualité du bois. Des informations manquent donc afin d'élaborer efficacement un modèle prédictif, malgré la prépondérance de certaines variables (température de l'air et précipitations) pouvant influencer la qualité de la fibre bois (densité du bois) (Bouriaud *et al.*, 2003; Kilpeläinen *et al.*, 2005; Watt *et al.*, 2008a). Certains liens restent à établir entre les attributs de fibre de bois et les caractéristiques des arbres et leur environnement. Jusqu'à maintenant il n'a pas été possible d'identifier de modèle prédictif permettant de modéliser la distribution spatiale des attributs de la fibre du bois. Toutefois, le développement d'un tel modèle spatial impose que les variables directrices soient disponibles au niveau des couches spatiales existantes, telles que l'inventaire forestier

traditionnel (placette ou carte forestière), le relief (modèle numérique d'altitude), le type de sol, etc. (Lei *et al.*, 2005).

1.3 État des connaissances

Ce sont les attributs de la fibre de bois qui influencent la qualité du produit final, que ce soit dans le domaine des pâtes et papiers ou encore du bois d'oeuvre (MacDonald et Hubert, 2002). Plusieurs auteurs se sont penchés sur la question des propriétés de bois, de la croissance des arbres et des variables susceptibles d'influencer cette croissance. Les méthodes pour y parvenir sont aussi très variées et c'est dans cette optique que de nombreuses pistes ont été étudiées au point de vue statistique afin d'en arriver à une méthode fiable, tenant compte des contraintes liées au présent projet d'étude.

1.3.1 Attributs de la fibre de bois

Dans le marché des produits forestiers, il existe des mesures qui permettent de qualifier la qualité du bois, c'est entre autres le cas du bois classé par contrainte mécanique, aussi connu sous son appellation anglophone machine stress-rated (MSR). Ces tests sont réalisés mécaniquement et les informations de contrainte de flexion et de module d'élasticité enregistrées sont utilisées pour classer le bois. Les grades de bois ont été créés pour répondre aux besoins de l'industrie et ainsi déterminer la qualité du bois en fonction de son utilisation finale, certaines caractéristiques étant désirables dans certains cas, mais pas dans d'autres (Jozsa et Middleton, 1994). Malgré le fait que le module de rupture (MOR) et le module d'élasticité (MOE) sont deux déterminants importants du grade MSR (Lei *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2007), l'éventail des attributs de la fibre de bois qui représentent des caractéristiques importantes pour l'industrie forestière va au-delà de cette mesure. Cependant, la venue de nouvelles technologies de pointe (ex. le SilviScan™) permet maintenant de mesurer un certain nombre de propriétés chimiques et physiques du bois et de la fibre de manière rapide et précise, grâce à l'analyse d'échantillons de bois (Downes *et al.*, 2002). Le SilviScan™ utilise entre autres la microscopie, la densitométrie, la diffraction par rayon X et l'analyse d'image pour analyser plusieurs caractéristiques de bois, et ce à différentes résolutions au sein d'un même arbre (Sherson *et al.*, 2007).

La complexité de la structure du bois demande une connaissance des mécanismes qui influencent les conditions de croissance des arbres (Jozsa et Middleton, 1994). Parmi les facteurs qui influencent les conditions de croissances, il y a les facteurs de nature géographique, climatique, relatifs au peuplement ou encore la présence de perturbations. C'est généralement l'aspect limitant de ces facteurs qui vont influencer les conditions de croissance (Fritts, 1976). Tout d'abord, les gradients environnementaux (ex. la latitude et l'élévation) sont reconnus pour leur influence sur la densité du bois et le module d'élasticité. Par exemple, l'augmentation de l'altitude aura un effet négatif sur la densité du bois (Vaganov *et al.*, 2006; Swenson et Enquist, 2007; Watt *et al.*, 2008a; Watt *et al.*, 2008 b). Durant la saison estivale, la croissance des arbres qui se situent à des latitudes et des élévations plus élevées est réduite, principalement parce que les températures y sont plus basses (Fritts, 1976). L'orientation de la pente a aussi une influence sur la quantité d'énergie solaire que vont recevoir les plantes, les pentes à l'est et au sud bénéficiant de plus d'ensoleillement. De plus grandes intensités et quantités de lumière ont un effet positif sur l'épaisseur de la paroi des cellules du bois et sur la densité (Fritts, 1976; Bouriaud *et al.*, 2004; Vaganov *et al.*, 2006).

Les facteurs climatiques jouent aussi un rôle d'importance dans la croissance et le développement des arbres et des végétaux en général. Plusieurs études montrent l'importance de la variable température de l'air pour expliquer la densité du bois (Bouriaud *et al.*, 2004; Watt *et al.*, 2008a), la longueur des fibres du bois (Kilpeläinen *et al.*, 2005) et le module d'élasticité (Watt *et al.*, 2008a). Ainsi, des températures plus élevées sont corrélées avec des densités de bois plus élevées, mais également avec des fibres de bois plus longues (Kilpeläinen *et al.*, 2005). Par contre, l'épaisseur de la paroi des cellules a été identifiée comme étant une variable inversement liée avec la température (Antonova et Stasova, 1993; Vaganov *et al.*, 2006). La saison de croissance est un élément important en particulier pour les espèces boréales, pour plusieurs espèces de conifères, c'est la croissance qui s'effectue dans la première moitié de la saison qui est la plus importante. La durée de la saison de croissance apparaît dans la littérature comme étant un élément clé expliquant la densité du bois, une saison plus longue produisant un bois plus dense. La température durant la saison de croissance influence aussi la densité du bois (Vaganov *et al.*, 2006). Les précipitations font aussi partie des variables de type climatique, souvent mentionnées avec la variable température, et elles influencent les attributs de la fibre, c'est le cas notamment

de la densité, du diamètre radial et de l'épaisseur de la paroi des cellules (Antonova et Stasova, 1993; Van Leeuwen *et al.*, 2011; Watt *et al.*, 2008a).

Les variables relatives au peuplement incluent : l'âge, la hauteur, les proportions de bois juvénile et mature, la densité du peuplement, la forme du houppier, le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) ainsi que la grosseur de la couronne. Ces variables sont souvent associées à la compétition qui existe entre les arbres présents dans un même peuplement. À travers les études publiées, l'âge et la densité du bois apparaissent fréquemment comme étant des variables qui sont liées (Colin *et al.*, 1992; DeBell *et al.*, 2004; Van Leeuwen *et al.*, 2011). La hauteur de la couronne est mentionnée dans certaines études comme un facteur servant à prédire le module d'élasticité (Lei *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2007). La hauteur de l'arbre quant à elle est négativement corrélée avec l'angle des microfibrilles (Van Leeuwen *et al.*, 2011). La densité du peuplement influence le module d'élasticité (Zhang, 2002; Lei *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2007), à l'inverse elle n'influence pas la densité du bois (DeBell *et al.*, 2004). Finalement, l'une des variables relatives au peuplement qui figure parmi celles les plus étudiées est le DHP. Cette variable, qui représente une croissance radiale, a des effets sur les attributs de la fibre suivants : le module d'élasticité (Lei *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2007) et sur la densité du bois (Jaakkola *et al.*, 2005; Swenson and Enquist, 2007).

Les perturbations sont des variables qui sont généralement externes et étroitement liées à la dynamique naturelle des peuplements. Font partie de ces perturbations, les traitements sylvicoles (ex. l'éclaircie précommerciale), les feux de forêt, les épidémies d'insectes défoliateurs et les chablis pour ne nommer que ceux-là. L'éclaircie précommerciale est une opération qui permet d'augmenter la vitesse de croissance chez les conifères, mais qui entraîne une densité de bois moindre, il s'agit toutefois d'une perturbation non naturelle (Jaakkola *et al.*, 2005).

Un indice de site est une mesure plutôt qualitative et qui est généralement basée sur plusieurs composantes. Pour l'île de Terre-Neuve, un indice a été développé, l'indice de Damman, utilisé dans l'inventaire forestier, mais qui devient difficile à modéliser, car aucune cartographie à l'échelle de la province n'est disponible pour représenter cet indice (Meades et Moores, 1989; Roberts *et al.*, 1996; Hamel *et al.*, 2004).

Dans le cas précis de l'épinette noire, il s'agit d'une essence reconnue pour ses propriétés mécaniques (Lei *et al.*, 2005 et Liu *et al.*, 2007). C'est entre autres pour cette raison que les études à son sujet sont un peu plus nombreuses que celles traitant du sapin baumier, dont les propriétés sont différentes. De manière générale, l'épinette noire possède les caractéristiques d'être un bois léger tout en étant fort. Au Canada, il s'agit de la principale essence utilisée dans le domaine des pâtes et papier. Cette espèce semble influencée par les facteurs climatiques, l'humidité du sol et les nutriments disponibles. La densité de l'épinette étant quant à elle influencée par la taille de l'arbre et la densité du peuplement. En ce qui concerne le sapin baumier, il est lui aussi utilisé pour les pâtes et papiers, mais également dans le bois de construction (structures légères). Le bois de cette espèce est léger et résistant et ses fibres sont généralement longues. Le sapin est une espèce compétitive pour l'espace dans un peuplement (Burns et Honkala, 1990).

Les caractéristiques de la forêt de Terre-Neuve ont été mises en lumière à travers différents travaux de recherche, souvent orientés sur la question des volumes de bois. Notons certaines études sur la biomasse forestière, où les données de l'inventaire forestier ont été utilisées afin de mettre en place des modèles utilisés pour cartographier la ressource en bois (Fournier *et al.*, 2003; Labrecque *et al.*, 2006; Luther *et al.*, 2006). C'est le manque d'information concernant la qualité du bois et sa répartition qui a mené à la réalisation de ce mémoire.

1.3.2 Modélisation

Différentes méthodes sont utilisées pour la modélisation des attributs de la fibre de bois (elles sont énumérées dans le tableau 2). Parmi les plus fréquentes, il y a tout d'abord les régressions. Elles sont utilisées sous plusieurs formes, que ce soit la corrélation de Pearson, la régression linéaire (Antonova et Stasova, 1993; DeBell *et al.*, 2004), la régression multiple, incluant celles du type pas-à-pas (stepwise), la méthode des moindres carrés (Lei *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2007; Watt *et al.*, 2008a), le modèle linéaire général (Bergqvist *et al.*, 2000) et les modèles linéaires mixtes, qui sont beaucoup utilisés en foresterie (Bouriaud *et al.*, 2004; Ngo et Rand, 2002; Wilhelmsson *et al.*, 2002). La régression multiple permet de mettre en lumière la relation entre une variable dépendante et plusieurs variables indépendantes. Les calculs de régressions visent à réduire la somme des écarts au carré entre les valeurs prédites et les valeurs observées et à

optimiser la corrélation entre les valeurs prédites et les valeurs observées (Tabachnick et Fidell, 1996). Les analyses de régression de type canonique (Lenz *et al.*, 2012) sont aussi des méthodes qui ont été recensées dans la littérature. La régression canonique vise à établir les relations existant entre 2 ensembles de variables (Tabachnick et Fidell, 1996).

L'analyse de variance (aussi connue sous le nom d'ANOVA) apparaît dans les méthodes d'analyses utilisées pour analyser les attributs de la fibre de bois (Kilpeläinen *et al.*, 2005; Watt *et al.*, 2008a). Ce type d'analyse est basé sur la comparaison de deux estimations de la variance. La première est la différence dans les résultats de la variance à l'intérieur de chacun des groupes (erreur de variance ou variance aléatoire). La seconde est l'estimation des différences dans la moyenne des groupes. L'analyse de variance permet d'étudier les variables qui sont sous forme de catégories, d'identifier les effets principaux et les interactions. D'autres types d'analyses sont dérivées de l'ANOVA, c'est le cas de l'analyse de covariance (ANCOVA) et des versions multivariées (MANOVA et MANCOVA) (Tabachnick et Fidell, 1996).

Les arbres de classification et de régression sont particulièrement bien adaptés à l'analyse de données complexes, telles que les données écologiques. Ce type d'analyse statistique non paramétrique a été utilisé par McKenney et Pedlar (2003) pour de la modélisation spatiale de deux essences forestières boréales. Les arbres de classification et de régression permettent de traiter les relations non linéaires, le haut degré d'interactions entre les variables ainsi que les valeurs manquantes. Ces méthodes statistiques peuvent être utilisés tant pour l'exploration interactive des données, que pour la description et la prédiction (De'ath et Fabricius, 2000).

Une autre catégorie d'analyses statistiques est celle dont font partie l'analyse en composante principale (ACP) et l'analyse factorielle (AF). Cela permet de faire ressortir les processus sous-jacents, qui font en sorte que les variables en présence sont liées entre elles. Les analyses de type ACP et AF font en sorte que les variables sont combinées en facteurs décorrélés (elles sont en quelque sorte décomposées), ce qui réduit le nombre de paramètres. Les analyses sont complexes, mais les résultats sont parcimonieux et les facteurs estimés fournissent souvent de meilleurs résultats que les variables observées (Esbensen, 2004; Tabachnick et Fidell, 1996).

Dans les modèles prédictifs de végétation, il est important de tenir compte de la distribution géographique dans les modèles, comme le démontre le travail de Miller *et al.* (2007). La

régression géographiquement pondérée est une méthode qui intègre les données de nature spatiale aux modèles de régression, par exemple un modèle numérique d'élévation. Ce genre de modèle permet de tenir compte de processus non stationnaire, soit en contradiction avec le principe intuitif en géographie qui stipule que : *plus deux éléments sont proches spatialement, plus ils sont susceptibles de se ressembler* (Brunsdon *et al.*, 1998; Kupfer et Farris, 2007; Miller *et al.*, 2007).

L'approche par maximum de vraisemblance a été principalement utilisée dans le domaine de la biologie (Hoeting *et al.*, 2006; Mazerolle, 2006), discipline où les variables et les interactions sont complexes et où une approche statistique de ce genre est appropriée. Il s'agit d'une méthode de sélection de modèles, où un ensemble de modèles candidats est élaboré et où les modèles les mieux supportés statistiquement sont identifiés. Parmi les indices utilisés dans les approches par maximum de vraisemblance, il y a le critère d'information d'Akaike (AIC), sa version pour les petits échantillons AICc et le critère d'information bayésien (BIC). Ces indices servent à évaluer les modèles et de les ordonner et peuvent aussi servir à l'estimation des paramètres d'intérêts et à effectuer de l'inférence multimodèle pour enrichir les analyses (Burnham et Anderson, 2004; Hegyi, 2011; Johnson et Omland, 2004).

Au chapitre de la validation, une méthode souvent utilisée dans les expérimentations est celle de la séparation du jeu de données. Tout d'abord une portion des données est utilisée pour créer les modèles (jeu de calibration), une seconde portion est utilisée seulement aux fins de vérification et pour comparer les résultats obtenus (jeu de validation) (Esbensen, 2004). Les jeux de données sont au préalable testés afin de vérifier certains postulats en regard de leur similitude (ex. test-t) (Morgan *et al.*, 2004). La validation croisée est généralement utilisée lorsque les données ne sont pas suffisantes pour séparer le jeu de données (Esbensen, 2004). Il s'agit d'une méthode de rééchantillonnage où des sous-ensembles sont créés à partir des données d'origine. Les modèles sont testés à répétition à l'aide de plusieurs sous-ensembles différents pour obtenir une évaluation des modèles. Lorsque le sous-ensemble de « calibration » est de taille $n-1$, que le sous-ensemble de « validation » est de un et que toutes les possibilités sont testées, il s'agit de la validation croisée de type « leave-one-out » (Stone 1974; Burman, 1989).

Malgré le grand nombre de possibilités parmi les méthodes d'analyse statistique, de modélisation et de validation, chaque cas est différent. Il faut alors bien étudier la problématique afin de

sélectionner la meilleure stratégie à adopter relativement à la taille de chaque échantillon et au type de données à analyser.

Tableau 2 – Liste des méthodes statistiques, leurs avantages et inconvénients principaux

Méthode	Référence	(+) Avantages / (-) Inconvénients
Régression linéaire, multiple et modèle linéaire général	Antonova et Stasova, 1993; Bergqvist <i>et al.</i> , 2000; DeBell <i>et al.</i> , 2004; Lei <i>et al.</i> , 2005; Liu <i>et al.</i> , 2007; Watt <i>et al.</i> , 2008a	(+) Simplicité d'utilisation, très utilisé dans divers domaines, possibilité d'utiliser avec de petits échantillons (-) Limité aux relations linéaires, sensible à la multicollinéarité.
Modèle linéaire mixte	Bouriaud <i>et al.</i> , 2004; Ngo et Rand, 2002; Wilhelmsson <i>et al.</i> , 2002	(+) Adapté aux données corrélées, Très utilisé en foresterie (-) Sensible aux données binaires
Régression canonique	Lenz <i>et al.</i> , 2012	(+) Nécessite un grand échantillon (-) Limité aux relations linéaires
Analyse de variance	Kilpeläinen <i>et al.</i> , 2005; Watt <i>et al.</i> , 2008a	(+) Simplicité d'utilisation, très utilisé dans divers domaines (-) Sensible à la multicollinéarité
Arbre de classification et de régression	De'ath et Fabricius, 2000; McKenney et Pedlar 2003	(+) Adapté aux données complexes, facilité d'interprétation (-) Sensible aux données sous forme de catégories
Analyse en composante principale et analyse factorielle	Esbensen, 2004; Tabachnick et Fidell, 1996	(+) Adapté pour l'analyse de processus complexes (-) Nécessite un échantillon relativement grand
Régression géographiquement pondérée	Brunsdon <i>et al.</i> , 1998; Kupfer et Farris, 2007; Miller <i>et al.</i> , 2007	(+) Considère les données de nature géographique (-) Nécessite un échantillon relativement grand
Approche par maximum de vraisemblance	Burnham et Anderson, 2004; Hegyi, 2011; Hoeting <i>et al.</i> , 2006; Johnson et Omland, 2004; Mazerolle, 2006	(+) Adapté aux petits échantillons, adapté pour l'analyse de processus complexes (-) Demande une bonne connaissance préalable du sujet
Validation		
Séparation du jeu de données	Esbensen, 2004	(+) Méthode très utilisée dans divers domaines (-) Nécessite un échantillon relativement grand
Validation croisée	Stone 1974; Burman, 1989	(+) Adapté aux petits échantillons (-)

1.4 Objectifs

Dans ce projet, il s'agira d'étudier le lien entre les attributs de la fibre de bois et les variables environnementales pour l'épinette noire et le sapin baumier. De plus, le développement d'un modèle prédictif passe par l'application d'approches globales de modélisation spatiale, telles que proposées par des auteurs tels que Franklin (1995), McKenney et Pedlar (2003) et Miller *et al.*

(2007), pour y greffer les connaissances acquises sur les variables ayant une influence sur la fibre de bois afin de produire un modèle prédictif validé pour le territoire de Terre-Neuve.

L'objectif principal de ce projet est d'utiliser la modélisation statistique afin de quantifier les relations pouvant exister entre les attributs de la fibre du bois et les variables géographiques, de végétation et climatiques disponibles pour l'ensemble de l'île de Terre-Neuve. Deux objectifs spécifiques découlent de cet objectif principal :

- Le premier objectif spécifique vise à utiliser les données d'inventaire forestier, les données géographiques et climatiques pour créer des modèles prédictifs des attributs de la fibre de bois pour l'épinette noire et le sapin baumier applicable pour toute l'île de Terre-Neuve.
- Le second objectif spécifique implique de généraliser les modèles prédictifs à l'ensemble de l'île de Terre-Neuve avec les données spatiales disponibles afin de produire une carte de la distribution spatiale pour chacun des attributs de la fibre de bois pour l'épinette noire et le sapin baumier.

1.5 Hypothèses

L'hypothèse principale de ce projet est la suivante : il est possible de déterminer une relation empirique permettant de prédire les attributs de la fibre de bois à l'aide de variables environnementales.

La modélisation des attributs de la fibre de bois à partir des données d'inventaire forestier et de données environnementales a déjà été réalisée (Lei et al., 2005; Watt et al., 2008). Malgré l'application pour des régions, des peuplements et d'espèces de type différent, ces études permettent de croire que le développement d'un modèle prédictif pour l'épinette noire et le sapin baumier est possible pour l'île de Terre-Neuve.

- La première sous-hypothèse identifiée est que la relation empirique décrivant les attributs de la fibre de bois en fonction des données d'inventaire forestier et des variables climatiques procure l'information permettant d'expliquer la distribution spatiale des attributs de la fibre de bois du sapin baumier et de l'épinette noire.

Des études portant sur l'épinette noire et d'autres espèces de résineux montrent des relations entre certaines caractéristiques environnementales et la productivité de l'arbre ainsi qu'une influence sur certains attributs de la fibre de bois (Hamel et al., 2004; Liu et al., 2007; MacDonald et Hubert, 2002).

- La deuxième sous-hypothèse est que les données disponibles dans les bases de données spatiales existantes sont suffisantes pour généraliser des modèles prédictifs de la distribution spatiale des attributs de la fibre du bois à l'ensemble de l'île de Terre-Neuve.

Des méthodes de spatialisation de modèles proposées par Franklin (1995) et McKenney et Pedlar (2003) permettent de croire que le sujet est propice à l'application sur un grand territoire.

2 Matériel et méthodes

2.1 Zone à l'étude

Le site à l'étude pour ce projet est l'île de Terre-Neuve, qui se trouve en forêt boréale et où les deux essences forestières commerciales dominantes sont l'épinette noire et le sapin baumier. Un total de 199 placettes d'échantillonnage permanentes (PSP – Permanent Sample Plot) ont été sélectionnées, distribuées spatialement à travers l'ensemble de l'île de Terre-Neuve, pour réaliser les différentes analyses (voir figure 5 - chapitre 3). Le terme placette se définit comme : « Une petite surface de forêt choisie comme étant représentative d'une zone plus étendue. »¹ Une placette typique est de forme rectangulaire et comprend un minimum de 75 arbres.

L'île de Terre-Neuve fait partie de l'écozone du bouclier boréal. L'altitude des terres se situe entre le niveau de la mer et peut atteindre des hauteurs allant jusqu'à 800 mètres. Terre-Neuve est influencée par un climat maritime et les précipitations annuelles sont supérieures à 1 000 mm, à l'exception de certaines régions plus au nord. Près de 75 % des précipitations tombent sous forme de pluie, et le reste, sous forme de neige. La moyenne des températures en hiver se situe entre -2 et -10 °C et entre 14 et 16 °C en été (Gouvernement de Terre-Neuve-et-Labrador, 2012). Selon la classification de Rowe (1972), Terre-Neuve comprend cinq régions biogéoclimatiques principales (dont l'une est une section non forestière). La section « Grand Falls » occupe le plateau central, au nord de l'île et est l'une des zones forestières les plus productives, dominées d'abord par l'épinette noire et ensuite par le sapin baumier. La topographie est plutôt plane avec un relief un peu plus vallonné dans le nord-est. La région est parsemée de plusieurs tourbières, lacs et rivières et les feux de forêt font partie de la dynamique forestière. La section « Corner Brook » est localisée sur la côte ouest de l'île et s'étend jusqu'au sud. C'est la deuxième zone forestière en importance et le sapin baumier est l'espèce dominante. La topographie est assez accidentée avec des portions planes près des côtes et dans les vallées. La section « Northern Peninsula » couvre la portion côtière du nord-est et du nord de l'île et la topographie est plutôt accidentée. Les zones forestières sont généralement bien drainées et le bois y est de bonne qualité et sa croissance affectée par l'exposition au vent. La section « Avalon » est située à

¹ Définition tirée du *grand dictionnaire terminologique* de l'Office québécois de la langue française (<http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/>).

l'extrême est de l'île. Il s'agit d'une zone de plateau, exposée au vent et peuplée par ordre d'importance par l'épinette noire et le sapin baumier. La dynamique des feux de forêt a favorisé la mise en place d'une couverture de végétation non forestière. Finalement, la section « Newfoundland-Labrador Barrens » est une section non forestière et montagneuse qui comprend la portion centrale au sud de l'île ainsi que les sommets de la péninsule nord (Rowe, 1972).

L'espèce forestière dominante sur l'île de Terre-Neuve est le sapin baumier, espèce principalement présente sur les sols humides et bien drainés. Les peuplements de sapin se retrouvent toutefois majoritairement dans la portion ouest de l'île, ainsi que dans la péninsule d'Avalon. Puis, il y a l'épinette noire, qui compte pour environ le tiers des peuplements et qui se retrouve principalement dans le centre de l'île. Sa répartition est due au fait que l'épinette peut vivre sur des sols très humides ou très secs, en plus d'être présente aux endroits affectés par des feux de forêt, comme c'est le cas pour le centre de l'île de Terre-Neuve (Gouvernement de Terre-Neuve-et-Labrador, 2011). La différence assez marquée entre les milieux où se retrouvent les deux espèces laisse supposer une influence importante du climat dans la répartition des peuplements à l'échelle du paysage. Si le climat influence réellement la répartition des peuplements, il est probable qu'il en soit de même pour la productivité et la qualité du bois de ces mêmes peuplements.

2.2 Schéma méthodologique

Ce projet est structuré autour de trois grandes étapes qui visent à réaliser l'ensemble des objectifs à atteindre (figure 1). Tout d'abord, il y a l'étape de la collecte et de la transformation des données pour les besoins du projet. Par la suite, le cœur du travail réside en l'analyse statistique des données et la modélisation, ce qui sert à mieux connaître les données en présence et les liens qui les unissent afin de créer les modèles prédictifs tant à l'échelle de la placette qu'à l'échelle du paysage (ensemble de la province). Finalement, une étape de spatialisation, où les modèles sont appliqués à un jeu de données couvrant l'ensemble de l'île de Terre-Neuve afin de créer des cartes de distribution spatiale des attributs de la fibre de bois. Aux deux dernières étapes s'ajoute la mise en place d'une procédure de validation croisée visant à estimer l'erreur de prédiction associée aux modèles.

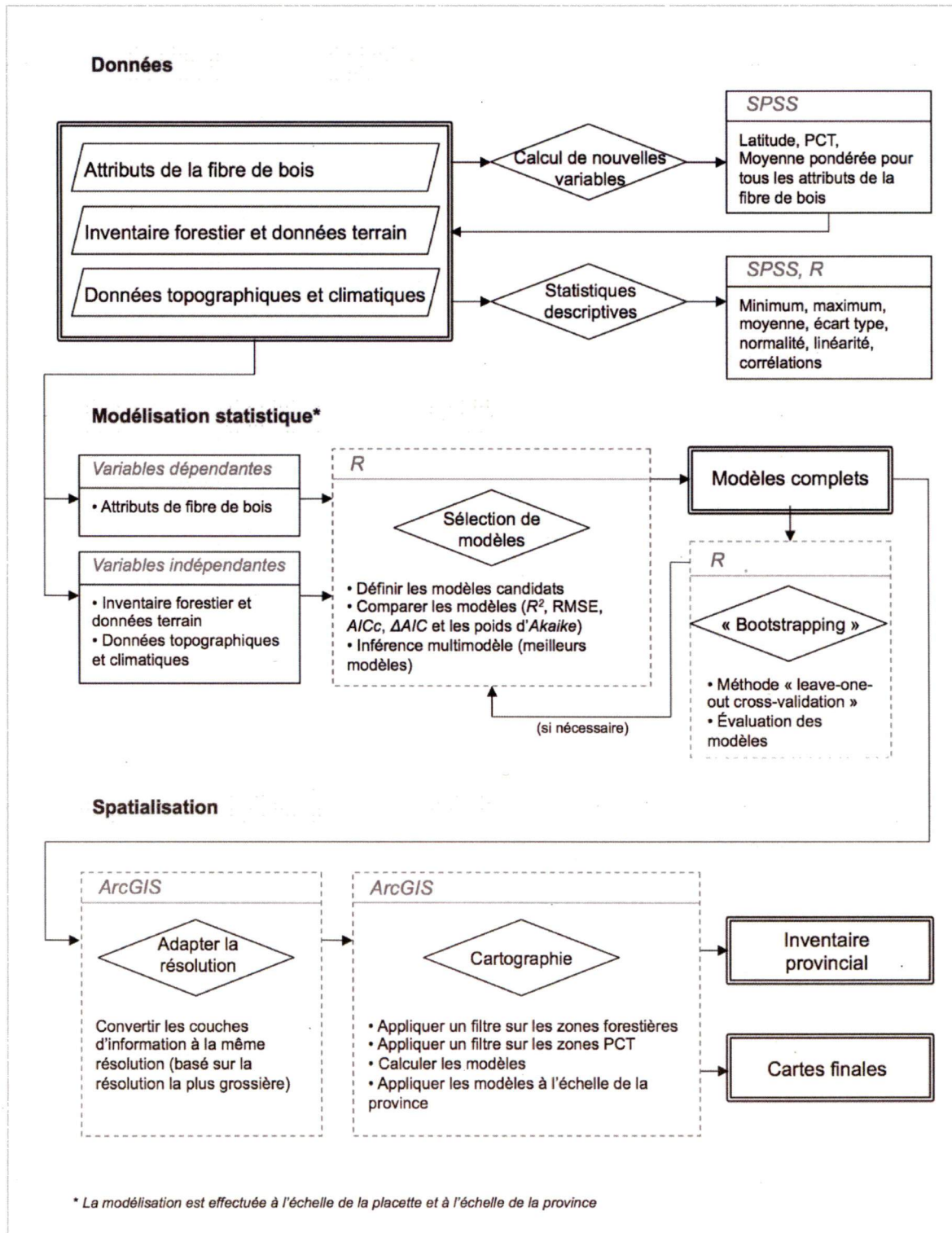


Figure 1 - Schéma méthodologique

2.3 Collecte de données

Une base de données, contenant plus de 150 variables issues de l'inventaire forestier, était disponible pour de fins de modélisation dans le cadre de ce projet. Plus d'une dizaine de variables climatiques étaient également disponibles pour l'ensemble des 199 placettes d'échantillonnage permanentes sélectionnées pour conduire la recherche (sur un total d'environ 1080 placettes actives). Le choix de ces placettes a été effectué par les chercheurs du Centre Canadien sur la Fibre de Bois, en fonction des données disponibles auprès du Gouvernement de Terre-Neuve et Labrador, afin d'obtenir un échantillon représentatif des différents types structurels de peuplements forestiers présents. Un minimum de trois échantillons pour chacune des combinaisons (espèce - hauteur - densité de couronne - index de site) ont été récoltés dans le but de bien représenter les conditions de croissance de l'ensemble de la forêt commerciale. Les placettes sélectionnées pour le présent projet ont fait partie du programme d'inventaire forestier qui s'est échelonné durant les étés de 2007, 2008 et 2009.

2.3.1 Attributs de la fibre de bois

Des carottes de bois ont été prélevées systématiquement dans les troncs d'une dizaine d'arbres à chacune des placettes. Les arbres sélectionnés font partie des espèces ayant une valeur commerciale, soit l'épinette noire et le sapin baumier. Les arbres échantillonnés se retrouvent à l'extérieur de la placette afin de ne pas altérer les arbres des placettes permanentes. La sélection des arbres pour effectuer la prise de carotte s'effectue à partir de l'un des coins de la placette, là où les conditions du site sont les plus représentatives de celles de la placette. Dix arbres commercialement utilisables sont sélectionnés à 10 mètres du coin choisi (dans un angle d'environ 130°) (figure 2). Les carottes prélevées ont un diamètre de 12 mm et couvrent le diamètre de l'arbre d'écorce à écorce, en passant par le centre dans la mesure du possible. Elles sont extraites à hauteur de poitrine à l'aide d'une tarière de *Pressler*, dans un axe aligné radialement avec le centre de la placette.

Les carottes extraites des arbres ont été envoyées au laboratoire de FPInnovations, division Paprican, de Vancouver pour que des analyses sur la qualité de la fibre de bois y soient réalisées à l'aide du *SylviScan* (voir chapitre 3). Il est à noter que les caractéristiques du bois diffèrent s'il est question de bois juvénile ou de bois mature, de bois initial ou de bois final (Jozsa et Middleton,

1994). Dans le cas présent aucune distinction n'a été utilisée. Les échantillons ont été récoltés à hauteur de poitrine et analysés dans leur ensemble, afin d'avoir un portrait actuel et général de l'arbre. Les huit attributs de la fibre qui sont étudiés dans le cadre de ce projet sont décrits brièvement afin de bien comprendre leur rôle au sein des propriétés du bois et leur importance pour l'industrie forestière.

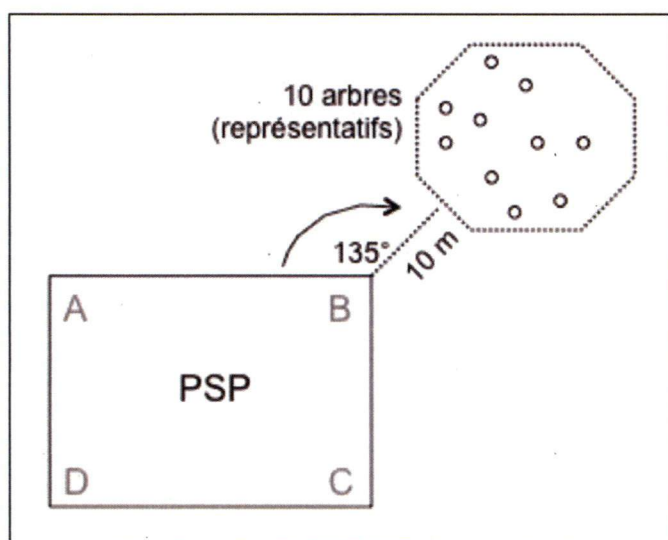


Figure 2 - Placette d'échantillonnage permanent (PSP-Permanent sample plot)

La densité du bois (kg/m^3) : La densité du bois est calculée en kg/m^3 et représente la proportion de tissus ligneux par unité de volume (Swenson et Enquist, 2007; Van Leeuwen *et al.*, 2011). Le bois de plus haute densité est généralement associé à du bois d'œuvre de meilleure qualité. Les propriétés et le rendement de la pulpe sont également influencés par la densité du bois, notamment le papier est plus résistant aux déchirures lorsque la pulpe provient de bois de grande densité (MacDonald et Hubert, 2002).

La masse linéique ($\mu\text{g/m}$) : La masse linéique (en anglais *coarseness*) représente un ratio masse/longueur exprimé en microgramme par mètre ($\mu\text{g/m}$) et est calculée à partir du diamètre des fibres de bois. La masse linéique est étroitement liée à la qualité du papier, lorsque la masse linéique est moindre, le papier est généralement de meilleure qualité avec plus de fibre par tonne de pulpe. La masse linéique qui diminue donne aussi des fibres qui s'écrasent plus facilement et qui s'agglomèrent bien donnant au papier plus de force et une texture plus lisse (Watson *et al.*, 2003; Van Leeuwen *et al.*, 2011).

La longueur des fibres (mm) : La longueur des fibres est mesurée en millimètres (mm). Il s'agit d'un autre attribut qui influence la qualité du bois d'œuvre et des produits issus des pâtes et papiers. Les fibres plus longues donnent un bois qui résiste mieux aux déformations (MacDonald et Hubert, 2002; Van Leeuwen *et al.*, 2011).

Le module d'élasticité (GPa) : Le module d'élasticité (en anglais *modulus of elasticity* ou MOE) se mesure en gigapascal, une mesure obtenue par densitométrie. Il s'agit d'un important indicateur de la rigidité du bois qui est également utilisé pour déterminer le grade du bois (Lei *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2007; Sherson *et al.*, 2007 ;Van Leeuwen *et al.*, 2011).

L'angle des microfibrilles (deg.) : L'angle des microfibrilles (en anglais *microfibril angle* ou MFA) est obtenu par diffractométrie et peut se définir comme étant l'angle (en degrés) des microfibrilles de la cellulose par rapport à l'axe le plus long des cellules individuelles du bois (figure 3). Il s'agit de l'un des attributs de la fibre qui influence grandement les propriétés mécaniques du bois. Lorsque l'angle des microfibrilles est grand, le bois présente plus d'élasticité alors que des angles plus petits donnent un bois plus rigide (Wimmer *et al.*, 2002; Sherson *et al.*, 2007).

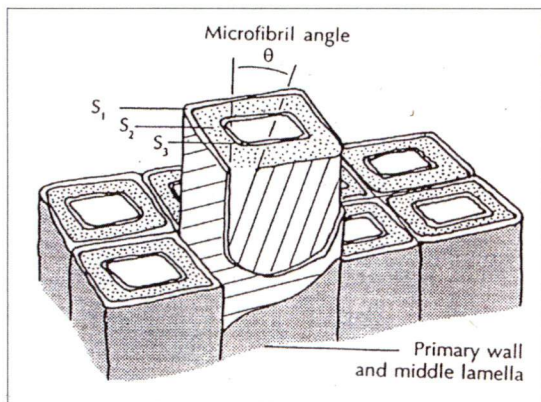


Figure 3 - Angle des microfibrilles (MacDonald et Hubert, 2002 (tiré de Dickson and Walker 1997))

L'épaisseur de la paroi des cellules (μm) : L'épaisseur de la paroi des cellules se mesure en micromètres (μm). Cet attribut de la fibre (jumelé au périmètre de la cellule) est important pour la production du papier. Des parois plus minces sont associées à des fibres qui s'écrasent plus facilement et qui s'agglomèrent mieux ensemble, ce qui confère une meilleure qualité au papier (Jang et Seth, 1998; Van Leeuwen *et al.*, 2011).

La surface spécifique (m^2/kg) : La surface spécifique (m^2/kg) représente le ratio surface/volume des fibres de bois et est calculée à partir de la densité et des profils diamétraux des trachéides. Il s'agit d'une caractéristique importante qui affecte les propriétés de la pulpe utilisée pour la fabrication du papier. Les fibres qui présentent une surface spécifique plus faible s'agglomèrent moins bien que celles dont la surface spécifique est plus vaste (Amiri *et al.*, 2004; Sherson *et al.*, 2007).

Le périmètre de la cellule (μm) : Le périmètre de la cellule est calculé à partir du diamètre radial et du diamètre tangentiel de la cellule (équation 1) et est mesuré en micromètres (μm) (Schimleck et Evans 2004). Les fibres de bois qui ont un périmètre plus large et des parois plus minces auront tendance à s'écraser plus facilement, ce qui permet d'obtenir des papiers plus denses, plus forts et plus lisses (Jang et Seth, 1998; Van Leeuwen *et al.*, 2011)

$$\parallel P = 2(R * T), \quad [1]$$

où P représente le périmètre de la cellule, R le diamètre radial et T le diamètre tangentiel.

2.3.2 Données d'inventaire forestier

L'inventaire forestier traditionnel comprend un ensemble d'environ 1 000 placettes d'échantillonnage permanent (en anglais *permanent sample plot* ou PSP), en milieu naturel et en milieu aménagé, et est réalisé de façon récurrente tous les quatre ans (au minimum) sur l'ensemble du territoire de l'île de Terre-Neuve. La sélection des peuplements pour l'établissement d'une PSP doit répondre à trois critères principaux. Premièrement, les PSP sont positionnées de manière aléatoire stratifiée sur tout le territoire forestier de l'île en fonction de trois caractéristiques : le type de peuplement (espèces dominante et secondaire), la densité (taux de recouvrement) et la hauteur du peuplement. Deuxièmement, le peuplement doit être distribué géographiquement à travers la région donnée (représentativité). Troisièmement, le peuplement ne doit pas se trouver dans une zone où des traitements sylvicoles ou de la récolte sont prévus. Une placette typique est de forme rectangulaire et de grandeur variable (voir annexe 1), selon la densité du peuplement, elle se doit toutefois de compter un minimum de 75 arbres qui répondent aux critères du type de placette (en régénération, immature, semi-mature, mature et surannée). Tous les arbres de la placette (qui rencontrent les critères de taille minimale) sont numérotés et identifiés par une étiquette métallique qui sert à identifier les arbres d'un inventaire à l'autre. Un

protocole établi détermine les mesures recueillies lors de ces inventaires (annexe 2), il y a notamment les mesures prises à l'échelle de l'arbre : l'espèce, le DHP (à 1,3 m du sol) qui est mesuré pour chacun des arbres de la placette à l'aide d'un ruban forestier, la hauteur de l'arbre mesurée à l'aide de tiges télescopiques, la condition du tronc, etc. Un certain nombre de données sont aussi recueillies à l'échelle de la placette : le type de placette, la classe d'âge, le ratio de branches vivantes (cime), etc., et sont évaluées visuellement puis notées selon différentes échelles préétablies (Newfoundland Forest Service, non publié). Un indice de site est également attribué et est établi en fonction de la classification de Damman, adaptée à Terre-Neuve (Meades et Moores, 1989). Finalement, certaines mesures par classes qualifient de manière générale la placette (âge, hauteur, densité de couronne, etc.) et ont été calculées par le SCF à partir des données de l'inventaire forestier.

2.3.3 Données climatiques

Les données environnementales sont calculées à partir de l'information provenant des stations météorologiques d'Environnement Canada situées sur l'ensemble de l'île de Terre-Neuve ainsi que de données d'élévation permettant de généraliser les données climatiques à l'ensemble du territoire. La liste des variables climatiques est présentée à l'annexe 3. Les variables les plus importantes généralement associées à la productivité forestière sont la température moyenne durant la saison de croissance, le nombre de degrés jours, les précipitations moyennes, le taux d'ensoleillement. D. McKenney de la Section des applications et de l'analyse des paysages (Centre de foresterie des Grands Lacs) a utilisé un progiciel élaboré par l'Australian National University, ANUSPLIN, pour produire une valeur pour toutes les variables de l'annexe 3 pour chaque placette à l'étude (McKenney *et al.*, 2007). Cette application utilise les valeurs mesurées de chacune des variables à spatialiser à partir des stations météorologiques et permet d'établir un modèle prédictif tenant compte du relief et de fonctions de type « spline ». Les données de pentes et d'altitude sont obtenues à l'aide d'un modèle numérique d'altitude (MNA). Ce modèle est disponible aux échelles 1:50 000 et 1:250 000 auprès du Centre d'information topographique du Gouvernement du Canada et est issu de l'extraction des courbes de niveau de la carte topographique de la base nationale de données topographiques (BNDT), du réseau hydrographique et de différents points cotés. L'application des modèles résultants des algorithmes ANUSPLIN permet donc de spatialiser les valeurs des variables environnementales

ciblées sur l'ensemble de l'île de Terre-Neuve avec une valeur pour chaque point d'une grille de 30 m (McKenney *et al.*, 2011).

2.4 Choix de la méthode

2.4.1 Exploration des données

L'exploration des données est une étape qui a été effectuée avant de conduire l'étape de la modélisation. Les valeurs associées à la distribution, l'étendue et l'écart-type des différentes variables environnementales potentielles ont été calculés (voir tableaux 3 et 4). De plus, les liens statistiques unissant les différentes variables environnementales entre elles ont été calculés à l'aide de corrélation de Pearson (annexe 4a). Grâce aux coefficients de corrélation, il a été possible de déterminer les variables trop semblables, et ainsi éviter de les inclure au sein des mêmes modèles afin d'éviter les problèmes de colinéarité.

Le même exercice d'évaluation de la colinéarité a été effectué pour l'ensemble des attributs de la fibre de bois (annexe 4b) afin de mettre en lumière les similitudes existant parmi ces différents attributs de la fibre, tant chez l'épinette noire que chez le sapin baumier. Plusieurs des attributs de fibres de bois sont reconnus pour varier de manière colinéaire et proviennent de variables communes (Downes et Drew, 2008). L'exploration des données est l'étape qui a permis d'appuyer statistiquement la décision d'utiliser le même ensemble de modèles candidats pour l'ensemble des attributs de la fibre. Dans la base de données de l'inventaire forestier, de même que parmi les variables climatiques, plusieurs des variables sont conceptuellement et statistiquement similaires et cette étape d'exploration des données a permis de confirmer le choix des variables à utiliser pour la modélisation, variables d'abord sélectionnées suite à la revue de la littérature.

Tableau 3 - Statistiques descriptives de l'épinette noire

	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	Asymétrie	Kurtosis
Attributs de la fibre de bois						
Longueur des fibres (mm)	1,72	2,60	2,26	0,18	-0,70	1,41
Densité (kg/m ³)	443,20	635,66	546,49	39,13	-0,22	-0,14
Diamètre radial (µm)	25,71	30,20	27,48	0,83	0,34	0,53
Diamètre tangentiel (µm)	24,16	27,77	26,33	0,66	-0,43	1,19
Masse linéique (µm/m)	306,75	444,65	381,97	29,37	-0,32	-0,05
Angle des microfibrilles (deg.)	10,63	28,19	15,55	3,29	1,51	2,96
Module d'élasticité (GPa)	7,10	17,63	13,92	2,29	-0,90	0,63
Épaisseur de la paroi des cellules (µm)	2,21	3,20	2,69	0,22	-0,24	-0,28
Surface spécifique (m ² /kg)	249,28	346,08	294,85	21,37	0,49	-0,10
Périmètre de la cellule (µm)	100,19	112,67	107,62	2,52	-0,26	0,01
Variables explicatives potentielles						
Élévation (m)	0,00	362,00	159,70	79,14	0,52	0,11
Latitude (deg.)	47,29	51,09	48,99	0,59	0,75	3,10
Pente (%)	0,00	35,00	6,74	7,49	1,80	3,50
Précipitations annuelles (mm)	930,00	1471,00	1131,82	118,26	0,56	-0,20
Température moyenne du trimestre le plus chaud (°C)	11,90	15,20	14,25	0,63	-1,57	2,80
Précipitations du trimestre le plus chaud (mm)	250,00	335,00	278,65	19,27	0,80	0,32
Température moyenne de la saison de croissance (°C)	9,77	11,59	11,06	0,38	-1,33	1,62
Précipitations totales de la saison de croissance (mm)	473,20	708,50	559,41	48,37	0,57	0,21
Nombre de jours de la saison de croissance	153,00	198,00	179,23	9,61	-0,67	0,18
Surface terrière du sapin baumier (%)	0,00	75,85	13,94	21,96	1,67	1,49
Surface terrière de l'épinette noire (%)	16,43	100,00	83,25	23,35	-1,68	1,59
DHP moyen (mm)	10,60	19,60	14,12	1,91	0,27	-0,32
Hauteur dominante (m)	9,00	17,90	13,30	1,95	0,11	-0,45
Hauteur moyenne (m)	7,10	12,10	9,51	1,23	0,18	-0,86
Densité du peuplement	625,00	3225,00	1794,28	621,65	0,17	-0,75
Surface terrière (m ² /ha)	10,38	54,34	29,24	10,25	0,25	-0,70
Volume total (m ³)	39,51	338,34	140,91	61,66	0,64	0,15
Volume marchand brut (m ³ /ha)	33,57	322,40	128,12	58,74	0,70	0,29
Classes de hauteur (m)	8,00	14,00	10,81	2,14	0,10	-1,00
Classes d'âge (ans)	50,00	130,00	91,82	24,32	-0,09	-0,67
Classes de densité de couronne (%)	36,00	87,00	57,19	14,32	-0,26	-0,33
Composition du peuplement / sapin baumier (%)	0,00	100,00	13,70	27,40	1,97	2,59
Composition du peuplement / épinette noire (%)	0,00	100,00	85,58	27,83	-1,86	2,15
Éclaircie précommerciale	0,00	1,00	0,10	0,31	2,65	5,15
Insectes	0,00	1,00	0,06	0,25	3,60	11,26

* Taille de l'échantillon = 77 placettes

Tableau 4 - Statistiques descriptives du sapin baumier

	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	Asymétrie	Kurtosis
Attributs de la fibre de bois						
Longueur des fibres (mm)	1,85	2,61	2,23	0,16	-0,30	-0,28
Densité (kg/m ³)	373,38	496,78	425,02	29,73	0,23	-0,71
Diamètre radial (µm)	27,90	32,87	30,67	1,03	-0,55	0,18
Diamètre tangentiel (µm)	26,17	29,57	27,77	0,71	0,00	-0,35
Masse linéique (µm/m)	295,40	410,38	346,67	21,65	0,13	-0,13
Angle des microfibrilles (deg.)	10,56	21,90	14,50	2,37	0,80	0,49
Module d'élasticité (GPa)	7,61	15,02	11,19	1,48	-0,11	-0,54
Épaisseur de la paroi des cellules (µm)	1,89	2,56	2,19	0,15	0,17	-0,43
Surface spécifique (m ² /kg)	312,13	408,23	358,37	21,90	0,07	-0,65
Périmètre de la cellule (µm)	108,98	123,24	116,88	3,14	-0,31	-0,05
Variables explicatives potentielles						
Élévation (m)	8,00	483,00	217,91	125,08	0,22	-1,25
Latitude (deg.)	47,23	51,29	49,30	1,01	0,24	-0,67
Pente (%)	0,00	42,00	8,16	8,03	1,78	3,78
Précipitations annuelles (mm)	918,00	1482,00	1217,20	138,47	0,09	-1,20
Température moyenne du trimestre le plus chaud (°C)	10,70	15,10	13,44	0,87	-0,61	-0,08
Précipitations du trimestre le plus chaud (mm)	245,00	364,00	306,29	24,29	-0,07	-0,47
Température moyenne de la saison de croissance (°C)	9,08	11,42	10,56	0,47	-0,46	-0,08
Précipitations totales de la saison de croissance (mm)	443,90	776,10	590,96	81,02	0,27	-1,28
Nombre de jours de la saison de croissance	142,00	198,00	172,68	12,38	-0,02	-0,43
Surface terrière du sapin baumier (%)	19,15	100,00	82,76	16,85	-1,53	2,42
Surface terrière de l'épinette noire (%)	0,00	78,22	7,72	15,63	2,69	7,58
DHP moyen (mm)	10,40	24,20	15,71	3,18	0,55	-0,33
Hauteur dominante (m)	9,00	19,10	14,41	2,31	0,26	-0,65
Hauteur moyenne (m)	4,20	14,00	10,52	1,66	-0,16	0,91
Densité du peuplement	175,00	4600,00	1979,05	988,70	0,60	-0,20
Surface terrière (m ² /ha)	5,98	67,91	36,68	12,39	0,22	-0,35
Volume total (m ³)	33,72	371,05	182,01	72,87	0,34	-0,67
Volume marchand brut (m ³ /ha)	31,77	339,70	165,75	69,19	0,35	-0,70
Classes de hauteur (m)	8,00	17,00	11,38	2,63	0,37	-0,56
Classes d'âge (ans)	30,00	130,00	74,62	28,09	0,85	-0,40
Classes de densité de couronne (%)	36,00	87,00	58,72	15,68	-0,09	-0,49
Composition du peuplement / sapin baumier (%)	0,00	100,00	92,78	18,72	-3,13	9,90
Composition du peuplement / épinette noire (%)	0,00	100,00	5,47	17,52	3,71	13,89
Éclaircie précommerciale	0,00	1,00	0,15	0,36	1,94	1,81
Insectes	0,00	1,00	0,10	0,30	2,65	5,13

* Taille de l'échantillon = 117 placettes

2.4.2 Sélection de modèles et inférence multimodèle

C'est la sélection de modèles, couplée à l'inférence multimodèle qui a été choisie comme méthode de modélisation. La méthode est décrite de manière plus approfondie dans le manuscrit (chapitre 3). La sélection de modèles, basée sur le critère d'Akaike, permet d'ordonner les modèles candidats et d'identifier ceux qui sont le mieux supportés par les données. Cette méthode utilise le maximum de vraisemblance pour établir la valeur du critère d'Akaike et pénalise les modèles trop complexes (ceux qui présentent un nombre élevé de variables) (Johnson et Omland, 2004). Parmi les avantages de la sélection de modèles, il faut noter la possibilité de tester

plusieurs hypothèses (modèles candidats). Il s'agit aussi d'une méthode appropriée pour les échantillons de petite taille. L'inférence multimodèle permet de tenir compte de plus d'un modèle à la fois, ce qui permet de traduire les relations complexes (comme c'est le cas par exemple la croissance des peuplements forestiers), mais permet aussi de réduire le biais par rapport à l'utilisation d'un seul modèle (Burnham and Anderson, 2002).

La revue de la littérature a permis la mise en place d'un ensemble de modèles candidats, basé sur des hypothèses plausibles et la connaissance des facteurs d'influence en ce qui a trait à la croissance des arbres (Stoke et Cunningham, 2006). L'ensemble de modèles candidats utilisé pour la modélisation est le même pour l'ensemble des attributs de la fibre de bois. Le nombre maximal de paramètres dans les modèles ne doit pas dépasser le ratio $n/10$ (incluant l'intercepte et la variance) afin de respecter le principe de parcimonie (figure 4) (Burnham et Anderson, 2002). Dans le cadre de notre étude, le nombre de paramètres a donc été limité à huit, soit six variables, l'intercepte et la variance (étant donné que la taille du plus petit échantillon (épinette noire) était de 77 placettes).

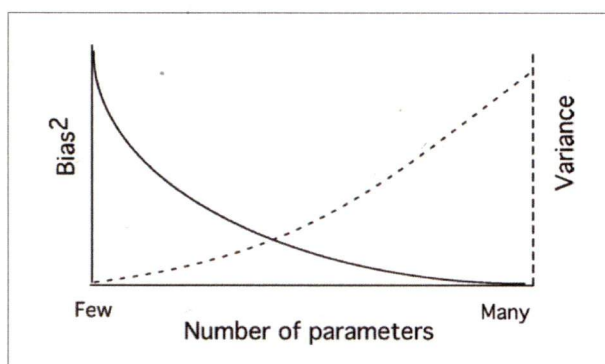


Figure 4 - Principe de parcimonie (Posada, 2004)

2.4.3 Spatialisation

L'étape de spatialisation a été réalisée en deux temps. Tout d'abord, il a été nécessaire de créer un ensemble de modèles candidats similaires à ceux utilisés à l'échelle de la placette. Certaines variables n'étant pas disponibles sous forme de couches spatiales, elles ont été remplacées par des variables conceptuellement équivalentes. La sélection de modèles, l'inférence multimodèle et la validation ont donc été recalculées pour les analyses au niveau cartographique du paysage.

La deuxième portion de la spatialisation concerne l'application des modèles à une base de données, sous forme de couches spatiales, couvrant l'ensemble de la province. Cette étape a permis la cartographie prédictive des quatre attributs de la fibre de bois traités au chapitre 3.

2.5 Résultats attendus

La méthode de modélisation a été choisie en fonction des contraintes liées à notre échantillon et correspond aux besoins identifiés pour ce projet. En regard des travaux effectués par différents chercheurs dans le domaine, il est permis de croire qu'une relation empirique entre chacune des propriétés de fibre de bois et les variables environnementales pourra être déterminée. Les données de l'inventaire forestier et les données climatiques devraient permettre de modéliser les attributs de la fibre de bois à l'échelle de la placette. Les différentes analyses statistiques (corrélation, sélection de modèle, inférence multimodèle) devraient également permettre d'identifier les variables qui jouent un rôle clé dans le développement des attributs de fibre de bois.

Parmi les attributs de fibre de bois qui sont les plus prometteurs en terme de modélisation, il y a : la densité du bois et le module d'élasticité. En effet, dans plusieurs travaux de recherche l'importance de ces variables a déjà été soulevée, principalement pour les liens avec la qualité du bois et des produits issus de l'industrie forestière. Au niveau des variables prédictives les plus prometteuses il y a celles liées au climat (température et précipitation), cependant les variables liées à la saison de croissance, à l'altitude et au nombre d'arbres par hectares risquent d'influencer à divers degrés les attributs de la fibre de bois. Finalement, il faudra voir si des associations de variables pourraient produire des résultats intéressants.

Pour tous les modèles élaborés, une capacité minimale de prédiction est souhaitable (c'est-à-dire des coefficients de corrélation au-delà d'un seuil de 0,40). Pour chacun des attributs de la fibre du bois, il sera possible de procéder à la spatialisation de l'information pour l'ensemble du territoire de Terre-Neuve à l'aide des couches d'information géospatiales sur la forêt et les variables environnementales. Cela permettra une mise en application et une intégration aux bases de données. Il s'agit d'un élément important puisque la notion de qualité du bois pourra être prise en compte dès l'étape de planification des opérations de coupes forestières. Cela devrait également

permettre d'améliorer les outils disponibles pour la gestion et la prise de décision relativement à l'aménagement forestier.

3 Modélisation prédictive de quatre attributs de la fibre de bois à Terre-Neuve

Le manuscrit a été accepté pour publication par le journal scientifique *Forest Ecology and Management* 21 octobre 2013, où il a été évalué par des pairs. Il contient la description de la méthode d'échantillonnage, ainsi que des méthodes utilisées pour modéliser les attributs de la fibre de bois et la spatialiser les attributs à l'échelle du paysage. Les résultats concernant quatre attributs de fibre de bois d'importance (densité du bois, masse linéique, la longueur des fibres et le module d'élasticité) sont présentés et l'article met l'accent sur les variables qui influencent de manière importante les attributs de la fibre.

Modeling wood fiber attributes using forest inventory and environmental data for Newfoundland's boreal forest

E. Lessard ¹, R.A. Fournier ^{1§}, J.E. Luther ², M.J. Mazerolle³ and O.R. van Lier⁴

¹ Centre d'Applications et de Recherches en Télédétection (CARTEL), Département de géomatique appliquée, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, J1K 2R1

² Natural Resources Canada, Canadian Forest Service – Atlantic Forestry Centre, University Drive, P.O. Box 960, Corner Brook, NL, Canada, A2H 6J3

³ Centre d'étude de la forêt, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, Québec, Canada, J9X 5E9

⁴ Natural Resources Canada, Canadian Forest Service – Canadian Wood Fibre Centre, University Drive, P.O. Box 960, Corner Brook, NL, Canada, A2H 6J3

§ Corresponding author: Richard.Fournier@USherbrooke.ca

Tel.:819-821-8000 ext. 63209; FAX: 819-821-7944

Abstract:

We explored the possibility of predicting wood fiber attributes across Newfoundland for two commercial species: black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) and balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill.). Estimates of key fiber attributes (including wood density, coarseness, fiber length, and modulus of elasticity) were derived from measurements of wood cores taken from sample plots representing a wide structural gradient of forest stands. Candidate models for predicting fiber attributes at plot and landscape scales were developed using an information-theoretical approach and compared based on Akaike's information criterion. The most influential variables were stand age and the presence of precommercial thinning. Other significant explanatory variables included those that characterize vegetation structure (mean diameter at breast height, dominant height), climate (annual precipitation, mean temperature of the growing season) and geography (elevation, latitude) depending on the species and fiber attribute being modeled. At the plot level, model inference gave root mean square errors of 5.3–11.9% for all attributes. At the landscape level, prediction errors were similar (5.4–12.1%) with the added benefit of being suitable for mapping fiber attributes across the landscape. The results obtained demonstrate the potential for predicting and mapping fiber attributes over a large region of boreal forest in Newfoundland, Canada.

Keywords: wood fiber attributes, Akaike's information criterion, environmental drivers, landscape mapping, spatial analysis, multimodel inference.

3.1 Introduction

There is a lack of information regarding the variation of wood fiber attributes across geographic locations for different species. However, this information is fundamental to optimize fiber use and improve competitiveness in the forest industry (MacKenzie and Bruemmer 2009; Pitt and Pineau, 2009). Wood fiber attributes provide indicators of wood quality that are linked to product potential and performance (i.e., pulp yield, strength and stiffness of lumber) (Kennedy, 1995; MacDonald and Hubert, 2002; Zhang et al., 2002). For example, knowledge of fiber attributes while planning forest operations can lead to improved fiber input to the paper mill leading to optimized industrial processes. Moreover, knowledge about fiber attributes may lead to the development of new products that require unique attributes. Obtaining information on fiber attributes is costly because direct measurement typically requires the extraction of core samples from trees. Thus, models are needed to predict fiber attributes from forest stand and environmental factors, which can be measured and mapped more easily over large areas.

Wood fiber can be described through a large array of attributes and the most cited attributes describing fiber also correspond to those considered to be the most important for forest industry: wood density, coarseness, fiber length, and modulus of elasticity (Bergqvist et al., 2000; Schimleck et al., 2002; van Leeuwen et al., 2011; Watson and Bradley, 2009; Watt et al., 2008a). Many studies emphasize wood density as a key variable because it is a good indicator of wood strength and stiffness. Wood density also plays a role in biomass and carbon storage estimation (van Leeuwen et al., 2011; Zobel and Van Buijtenen, 1989).

Studies on wood fiber attributes in boreal forests have focused on conifer species, such as white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss) (Lenz et al., 2012), black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) (Liu et al., 2007), Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) (Kilpeläinen et al., 2005), and Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carrière) (MacDonald and Hubert, 2002). The relationships between wood fiber attributes and stand variables have been studied mainly in plantations of softwood species (Lei et al. 2005; Watt et al. 2008b), and only a few studies investigated those relationships in natural stands (Wilhelmsson et al., 2002; Liu et al., 2007). Previous arguments support the idea that environmental factors (climate and forest inventory variables) influence wood fiber attributes and provide promising avenues to develop predictive models both in

managed and natural stands. To our knowledge, no predictive models using typical forest inventory data are currently available to inform decisions at the landscape scale.

Climate and site play an important role in tree growth, and many studies have reported correlations between fiber attributes and climatic variables. For example, temperature and precipitation influence wood density (Kilpeläinen et al., 2005; Swenson and Enquist, 2007; Watt et al., 2008b; Wimmer et al., 2002). Wood fiber attributes have also been linked to forest stand and tree variables, such as precommercial thinning (MacDonald and Hubert, 2002), age (Wilhelmsson et al., 2002), diameter at breast height (DBH, in cm measured at 1.3 m), height (Liu et al., 2007; van Leeuwen et al., 2011), competition, stand density (van Leeuwen et al., 2011), elevation (Swenson and Enquist, 2007), aspect and slope (Stage, 1976). Most of these relationships were quantified through various statistical techniques such as analysis of variance, generalized linear models, linear mixed effects models, ordinary least squares regression, path analysis, or stepwise regression (Bergqvist et al., 2000; Bouriaud et al., 2004; Lei et al., 2005; Liu et al., 2007; Watt et al. 2008b; Wimmer et al., 2002). Akaike's information criterion (AIC) (Burnham and Anderson, 2002, 2004; Mazerolle, 2006) is another approach that is well designed for exploring the effect of multiple predictor variables and for identifying the most parsimonious models predicting wood fiber attributes in complex natural environments (Burnham and Anderson, 2002, 2004; Johnson and Omland, 2004; Mazerolle, 2006).

The overall goal of the study was to model and map wood fiber attributes across the merchantable forest area of Newfoundland. Our working hypothesis was that wood fiber attributes of black spruce and balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill.) stands are related to environmental variables and forest variables measured in existing inventory plots or available from stand-level maps. Three key research questions were identified: (1) what are the relationships between fiber attributes and available forest inventory and environmental data ? (2) to what extent can the relationships be used to predict and map fiber attributes across Newfoundland ? and (3) what models can be used with the available spatial data to produce maps of fiber attributes for Newfoundland ? Specific objectives were to:

- i) Identify environmental and forest inventory variables that can be used to predict wood fiber attributes.

- ii) Develop predictive models at the plot level for estimating fiber attributes from an extensive database of wood fiber attributes measured *in situ* at plot locations.
- iii) Develop predictive models at the landscape level for mapping fiber attributes for the island of Newfoundland using available spatial databases.

3.2 Methods

3.2.1 Study site

The study was conducted on the island of Newfoundland (111,390 km²), located in eastern Canada (Fig. 5) centered around 48°32'30" N and 56°07'30" W. Topography varies from relatively rugged with flat valley bottoms in the western part of the island to gently rolling relief with large areas of low relief in the central part, and a rolling plateau in the eastern part. The area is characterized by the presence of many lakes, bogs and rivers (Rowe, 1972). Located within Canada's boreal forest, the two dominant species are black spruce and balsam fir. Black spruce accounts for approximately one-third of the trees found on the island. This slow-growing tree is usually found on very humid or very dry soils and especially in areas affected by forest fires (Government of Newfoundland and Labrador, 2011; Mullins and McKnight, 1981; USDA Forest Service, 1990). Balsam fir stands dominate mainly moist and well-drained sites.

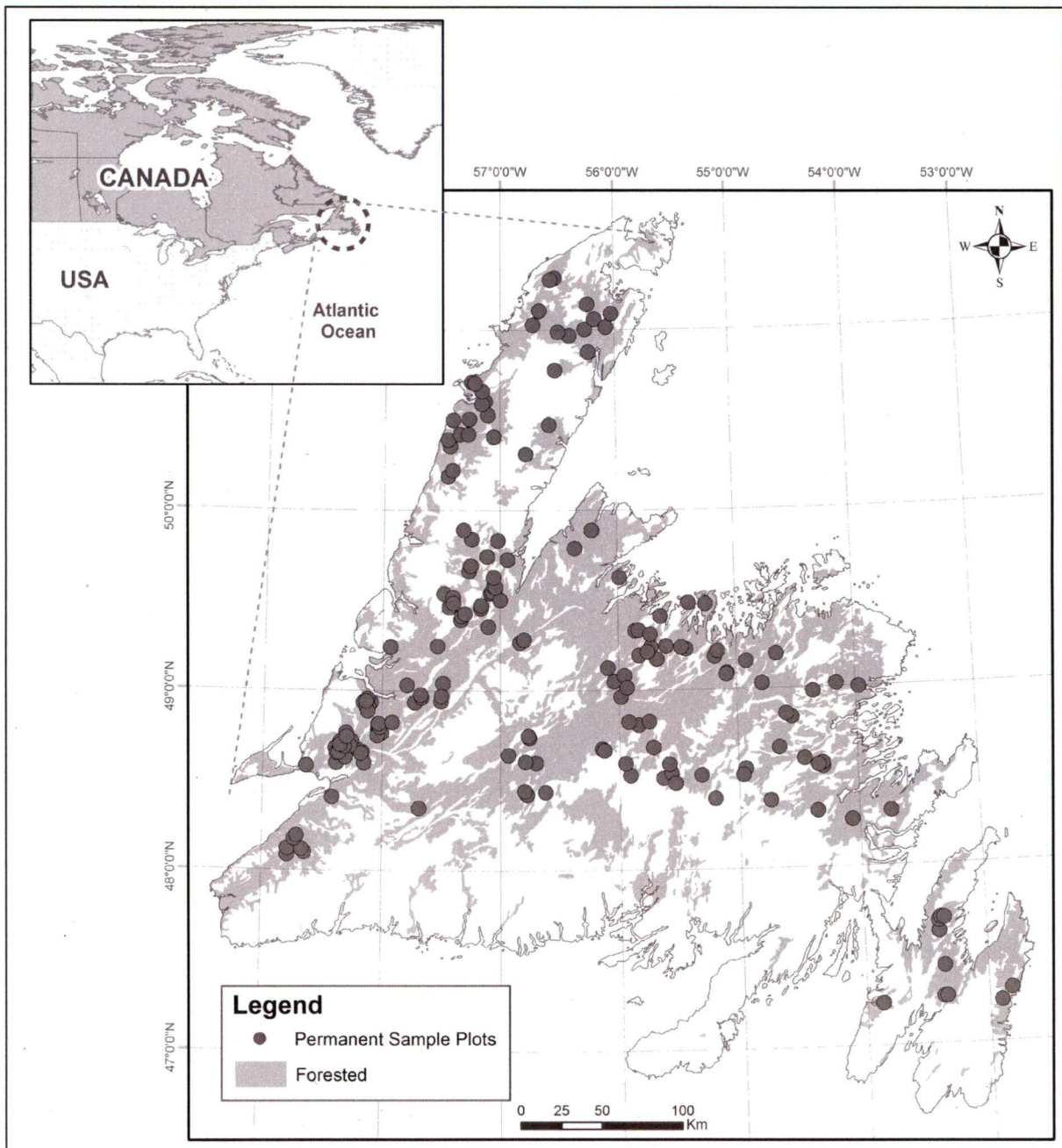


Figure 5 - Core sampled plots and forested area across Newfoundland, Canada.

3.2.2 Plot-level data

The Newfoundland Department of Natural Resources collects inventory data through a network of permanent sampling plots (PSPs). All plots are rectangular in shape, with size varying for immature and semi-mature stand types and fixed at 1/25 ha for mature and over-mature types.

Plot size is dependent on stand density and as a rule should contain a minimum of 75 trees. The PSP program consists of about 1,000 different locations across Newfoundland in natural and managed stands and each PSP is revisited every 4 to 6 years. All the trees inside a plot are numbered. Tree characteristics are recorded in a database and updated every time there is a new inventory (Newfoundland Forest Service, 2011). For this study, a subsample of 194 PSPs (77 black spruce-dominated plots and 117 balsam fir-dominated plots) was selected across the island. The subsample targeted three replicates within each combination of species, height, crown density and site index classes in order to capture a wide range of forest growing conditions within the merchantable forest area.

At each PSP, wood cores were extracted from a sample of ten live merchantable trees to measure fiber attributes. These ten trees were selected starting at 10 m outside the plot (at a 130° angle) from the plot's corner where the site conditions were the most representative of the PSP. The cores were sent to the FPInnovations laboratory in Vancouver for analysis of the suite of fiber attributes using a combination of optical microscopy, image analysis, X-ray densitometry and X-ray diffractometry (Downes et al., 2002; FPInnovations, 2009; Schimleck et al., 2002; Schimleck and Evans, 2004; Sherson et al., 2007). Density (kg/m^3) was measured at 8% moisture content by irradiating a sample with X-rays and detecting the amount of radiation transmitted through the sample. X-ray absorbance was related to density according to Beer's Law. The measured density was scaled to match the average density of the core measured from its volume (micrometry) and its mass to ensure that average density of the sample matched the average density predicted by *SilviScan* technology (FPInnovations, 2009). Coarseness ($\mu\text{g/m}$) was calculated combining wood density and tracheid diameter profiles obtained from the *SilviScan* analysis. Fiber length (mm) was measured using a HiRes Fiber Quality Analyzer (HiRes FQA (Hawkesbury, ON)) (a commercial instrument developed jointly by Paprican, the University of British Columbia and OpTest Equipment Inc.) using a fiber solution made from macerated wood cores. Modulus of elasticity (MOE in GPa), which is a measure of wood stiffness, was estimated from wood density and diffraction patterns of the wood obtained from a wide-angle X-ray detector (Evans and Ilıc, 2001; FPInnovations, 2009; Sherson et al., 2007).

For all plots with a minimum of three trees of the species of interest (balsam fir or black spruce), an average plot value (weighted by basal area of all the sampled trees based on the basal area of a given species) was calculated for each fiber attribute (Table 5):

$$AveragedMean = \sum_{PSP} \left(\frac{FiberAttribute_{tree} \times BasalArea_{tree}}{\sum BasalArea_{tree}} \right) \quad [2]$$

For each PSP, individual tree measurements were recorded *in situ* and aggregated to derive plot-level estimates. Specifically, DBH and species were recorded for each tree. Height was measured for a sample of trees at each plot and species-specific relationships between DBH and height were developed for each ecoregion and used to predict height for all trees. The individual tree diameters for all trees >9 cm DBH were averaged (arithmetic mean) at the plot level to obtain an estimate of the mean DBH for each plot. Dominant height (Hdom) was calculated as the average height (in meters) of the tallest 100 living trees per hectare. Species composition was calculated as the ratio between the sum of all individual tree basal areas of a given species within a plot and the sum of all individual tree basal areas within a plot (as a percentage). Composition values for black spruce ranged from 16.4 to 100% and values for balsam fir ranged from 19.2 to 100%. Stand age (in years) of the PSP was estimated according to the midpoint value of an age class range. Elevation (in meters) and latitude (in degrees–minutes–seconds) were recorded using a Trimble ProXL global positioning system (GPS). Precommercial thinning (PCT) was recorded for the managed stands.

Table 5 - Descriptive statistics of wood fibre attributes for black spruce and balsam fir field plots.

Fibre attributes	Black spruce (n = 77)			Balsam fir (n = 117)		
	Range	Mean	S.D.	Range	Mean	S.D.
Wood density (kg/m ³)	443.2 - 635.7	546.5	39.13	373.4 - 496.8	425.0	29.73
Coarseness (μg/m)	306.8 - 444.7	382.0	29.37	295.4 - 410.4	346.6	21.65
Fibre length (mm)	1.72 - 2.60	2.26	0.18	1.85 - 2.61	2.23	0.16
Modulus of Elasticity (GPa)	7.10 - 17.63	13.92	2.29	7.61 - 15.02	11.19	1.48

Climatic variables were interpolated for each PSP using the *ANUSPLIN* interpolation method and weather measurements taken at Environment Canada's meteorological stations across Newfoundland (McKenney et al., 2007). We considered mean temperature during the growing season and annual precipitation relevant to forest productivity (Hamel et al., 2004). Annual

precipitation (mm) was the sum of all monthly precipitation. The mean temperature of the growing season was estimated using temperature-based rules. The growing season began when the mean daily temperature was $\geq 5^{\circ}\text{C}$ for 5 consecutive days after 1 March and ended when the average minimum temperature was $< -2^{\circ}\text{C}$ beginning 1 August (McKenney et al., 2007).

3.2.3 Landscape-level data

Landscape-level forest stand data were acquired from the Government of Newfoundland and Labrador (Newfoundland Forest Service 1991). The stand-level maps were polygon based, resulting from the interpretation of aerial photographs (scale of 1:12,500) acquired between 1995 and 2008. Several attributes were extracted from the mapped data, including species composition, age class, height class, and site class. Species composition at the landscape level reflected the percentage of balsam fir or black spruce basal area of a stand derived from the upper limit of the species composition (Delaney and Osmond, 1977). Crown density and height were estimated according to the midpoint value of interpreted class ranges. The same climatic variables described above were interpolated as raster layers with a $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ grid resolution from an original resolution of 150 arcseconds (McKenney, 2006; McKenzie et al., 2007). Elevation was extracted from a province-wide elevation grid of 0.75 arcseconds (Canadian Digital Elevation Data, 2000).

3.3 Statistical analyses

3.3.1 Plot-level modeling

For this study, we adopted the information-theoretic approach based on Akaike's information criterion (AIC) which is widely used in ecology (Dochtermann and Jenkins, 2011; Mazerolle, 2006; Richards et al., 2011) and phylogenetics (Posada and Buckley, 2004). This approach was well adapted for the present study as the relationships modeled were complex and involved multiple predictors (Burnham and Anderson, 2002, 2004; Johnson and Omland, 2004; Mazerolle, 2006). The approach consists in specifying *a priori* a number of candidate models featuring the attributes of interest, each model representing a scientific hypothesis. Instead of relying on P values and the inherent problems of using significance testing to select variables, we compared models based on AIC (Burnham and Anderson, 2002; Mazerolle, 2006). The strength of evidence

in favor of each model was based on the differences between each model relative to the most parsimonious model (ΔAIC) as well as the normalized weights (Akaike weights, ω_i). The latter weights were interpreted as probabilities that a given model was the most parsimonious based on the data set and the models considered (Burnham and Anderson, 2002). In cases where more than one model ranked highly, inference was based on the entire set of models by computing model-averaged estimates and predictions.

Candidate multiple regression models were developed with the wood fiber attributes as response variables (Y) and the forest stand and environmental data as explanatory variables (X) following the form: $Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + b_pX_p + \varepsilon_i$ (Liu et al., 2007; Watt et al., 2008b), where ε_i denotes normally distributed errors. Given the available sample sizes (black spruce $n = 77$, balsam fir $n = 117$), the models were limited to fewer than eight parameters (including the intercept and residual variance) in order to avoid overparameterization and to produce reliable estimates (Burnham and Anderson, 2002). The candidate model set was developed based on a thorough review of the literature to identify variables of influence from studies covering various softwood species and including general knowledge of tree allometry theory (van Leeuwen *et al.*, 2011; Zobel and van Buijtenen, 1989). The explanatory variables were separated into four groups representing the main factors expected to influence the suite of fiber attributes: geography, climate, vegetation and disturbance. Models were then developed using each group of variables independently and in various combinations to represent the influence of each factor (Table 6). Explanatory variables with (Pearson $|r| > 0.70$) were not included in the same model in order to reduce potential collinearity. Considering that there were moderate to strong correlations among four fiber attributes (Table 5; Pearson $|r| > 0.54$ with one exception), the same candidate models were used to model all four fiber attributes. Assumptions of homogeneity of variance and normality of residuals were evaluated with residual plots and with Non-Constant Error Variance (NCV) and Shapiro-Wilk tests, respectively.

The candidate models were ranked according to the AIC corrected for small sample size (AIC_c), defined as:

$$AIC_c = -2(\log\text{-likelihood}) + 2K + \frac{2K(K+1)}{(n-K-1)}, \quad [3]$$

where K is the number of estimated parameters in the model including the intercept and the error term. Models were compared with the top-ranking model with delta AIC_c (Δ_i):

$$\Delta_i = AIC_{ci} - \min AIC_{ci}, \quad [4]$$

where AIC_{ci} is the AIC_c value for a given model i and $\min AIC_{ci}$ is the AIC_c value for the “best” model (smallest AIC_c value). Usually, a $\Delta_i < 2$ suggests a good model, whereas $2 < \Delta_i < 4$ suggests a potentially useful model. Models with a Δ_i between 4 and 7 have a weaker value, whereas those with $\Delta_i > 10$ indicate models that have low support (Burnham and Anderson, 2002).

Normalizing the Δ_i yields Akaike weights (ω_i), which can be interpreted as the probability that a given model r is the best among the set of R models:

$$\omega_i = \frac{\exp\left(\frac{-\Delta_i}{2}\right)}{\sum_{r=1}^R \exp\left(\frac{-\Delta_r}{2}\right)}. \quad [5]$$

When the top-ranked model has a ω_i below 0.90, it indicates that other models also have some strength. In such cases, multimodel inference (or model averaging) was used to make model-averaged predictions of fiber attributes based on the entire model set (Burnham and Anderson, 2002). In essence, each prediction made by each model was weighted by its corresponding Akaike weight, such that a model with high support contributes more to the prediction than a model with a lower AIC_c weight. This approach yielded weighted average predictions as well as unconditional standard errors and was used to construct 95% confidence intervals around predictions (Burnham and Anderson, 2002; Hegyi and Garamszegi, 2011; Johnson and Omland, 2004; Mazerolle, 2006). Following a similar strategy, the effects of the explanatory variables with the most support (i.e., those included in models with $\Delta_i < 4$) were determined by computing model-averaged estimates, unconditional standard errors, and 95% confidence intervals (Buckland et al., 1997; Burnham and Anderson, 2002; Mazerolle, 2012). Explanatory variables for which the 95% confidence interval excluded 0 indicated that the variable influenced the response variable.

The remaining explanatory variables were ranked according to the relative size of their standard error (SE) compared with their model-averaged estimate: the smaller SE compared with the model-average estimate, the more predictive power was assumed. A SE of more than half the model-averaged estimate was not considered to have a good predictive power. Ranking the explanatory variables of importance was thus possible from the ratio of SE over the model-averaged estimate.

3.3.2 Model validation

Model fit was assessed by the root mean square error (RMSE) and the relative RMSE (RMSE_r):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2}{n}} \quad RMSE_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(\hat{Y}_i - Y_i)]^2}{\sum_{i=1}^n [Y_i]^2}} \quad , \quad [6]$$

where n is the number of PSPs, Y are the observed values of wood fiber attributes, and \hat{Y} are the predicted values of fiber attributes for each model.

Leave-one-out cross-validation (LOOCV) was used to estimate the prediction error. The sample (n) was divided into a training set (size $n-1$) and a validation set (size 1). The models were fit using the training set with one observation left out. The process was repeated until all possible combinations (splits) were tried (Stone, 1974). From those splits, a cross-validation estimate of the prediction error was computed for each model. The cross-validation estimates were then weighted by the Akaike weights (ω_i) and summed to obtain a model-averaged estimate of prediction error. All analyses were executed in R 2.15.0 (R Development Core Team, 2012). Model selection and multimodel inference were conducted with the *AICcmodavg* package (Mazerolle, 2012), and the LOOCV procedure was executed with the *boot* package (Canty and Ripley, 2012).

3.3.3 Landscape-level modeling and mapping

The plot-level models allowed for the prediction of fiber attributes for plot locations, but they did not allow for producing a continuous map because not all explanatory variables were currently

available as spatial layers. Therefore, landscape-level models were developed using variables that were conceptually similar to those used in the plot-level models but were available as spatial layers. For example, mean DBH was not available from the current stand-level inventory; therefore, crown closure was used to represent the vegetation structure. Similarly, height was derived from the height class interpretation rather than the measured heights of individual trees. Also, the species composition was derived from the more general stand-level species label rather than being estimated from the individual tree measurements. Otherwise, all other predictor variables were the same as those used in the plot-level modeling. Thus, the landscape-level modeling relied on the same methods (model selection and validation) as the plot-level modeling; however, the models were redeveloped using the explanatory variables that were available as spatial layers.

The species-specific models were implemented at the polygon level within ArcGIS™ software (ESRI®, Redlands, California, United States of America). A geometric intersection (Union) was first performed between the commercial forest stand and PCT layers of the provincial forest inventory in order to create spatially explicit polygons of PCT and non-PCT commercial forest stands. A minimal mapping unit of 0.5 ha was applied. We removed from the analysis all polygons that were outside the predictable range defined by the sampling design (i.e., commercial forest stand with height below 9.5 m; crown density lower than 25%). The predictor variables of interest from the forest inventory consisted of species composition, age class, height class, crown density class, and PCT. These variables were maintained in the attribute table of the resulting polygon layer. We converted the ordinal variables age class, height class, and crown density class to numerical values data by using the class midpoints. PCT remained binary (i.e., 1 if PCT, 0 otherwise), whereas species percentages were derived from the species composition attribute using the upper class limit. For example, a stand with a species label of *bSbF* was assigned 75% black spruce and 25% balsam fir, as per Delaney and Osmond (1977). Mean zonal statistics of raster predictor variables (elevation, latitude, mean temperature of the growing season, annual precipitation) were computed for each polygon using the Geospatial Modelling Environment (GME) extension (<http://www.spatial ecology.com/gme/index.htm>) and appended to the existing attribute table. For each species, the model-averaged equations were applied to each polygon where the respective species was present in the species composition attribute.

Table 6 - List of candidate plot and landscape level models applicable to both black spruce and balsam fir dominated stands.

Models	Plot	Landscape
	<u>Solo variables</u>	
Mod1	Elevation	Elevation
Mod2	Latitude	Latitude
Mod3	Annual precipitation	Annual Precipitation
Mod4	Mean temperature of growing season	Mean Temperature of growing season
Mod5	Species composition*	Species composition*
Mod6	Dominant height	Height
Mod7	Mean dbh	Crown density
Mod8	Age	Age
	<u>Disturbance (D)</u>	
Mod9	PCT	PCT
	<u>Geography (G)</u>	
Mod10	Elevation + Latitude	Elevation + Latitude
	<u>Climate (C)</u>	
Mod11	Mean temperature of growing season + Annual precipitation	Mean temperature of growing season + Annual Precipitation
	<u>Vegetation (V)</u>	
Mod12	Mean dbh + Age	Crown density + Age
Mod13	Species composition + Dominant height + Mean dbh + Age	Species composition + Height + Crown density + Age
	<u>Combined models</u>	
Mod14 (G+C+V)	Elevation + Mean temperature of growing season + Annual precipitation + Species composition + Dominant height + Mean dbh	Elevation + Mean temperature of growing season + Annual precipitation + Species composition + Height + Crown density
Mod15 (G+C+D)	Elevation + Mean temperature of growing season + Annual precipitation + PCT	Elevation + Mean Temperature of growing season + Annual Precipitation + PCT
Mod16 (C+V+D)	Mean temperature of growing season + Annual precipitation + Species composition + Mean dbh + Age + PCT	Mean temperature of growing season + Annual precipitation + Species composition + Crown density + Age + PCT
Mod17 (G+V+D)	Elevation + Latitude + Species composition + Age + Dominant height + PCT	Elevation + Latitude + Species composition + Age + Height + PCT
	<u>Global model</u>	
Mod18	Elevation + Mean temperature of growing season + Annual precipitation + Age + Mean dbh + PCT	Elevation + Mean temperature of growing season + Annual precipitation + Age + Crown density + PCT

* Species composition values are different for plot and landscape level.

Table 7 - Pearson's correlation among fibre attributes estimated at the plot level for black spruce and balsam fir.

	Black Spruce			
	Density	Coarseness	Fibre Length	Mod. of elasticity
Fir Density (kg/m ³)		0.816*	0.578*	0.750*

Coarseness ($\mu\text{g/m}$)	0.696*		0.756*	0.782*
Fibre Length (mm)	0.312*	0.645*		0.719*
Modulus of Elasticity (GPa)	0.586*	0.650*	0.549*	

*Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

3.4 Results

3.4.1 Plot-level model selection and inference

Plots of residuals versus predicted values did not reveal significant outliers or issues with model assumptions. This was supported with graphical and statistical tests of homoscedasticity and normality (not shown). We identified the most parsimonious models based on model selection (Table 8). For black spruce, the same two or three models were always within the 95% confidence set (i.e. the sum of the ω_i values representing the “top models” was ≥ 0.95). For most fiber attributes, the top-ranking model had at least double the support of the other ones (based on evidence ratios or Akaike weights): i.e., Mod16 for wood density and coarseness, and Mod17 for modulus of elasticity. However, Mod13 and Mod17 were highly competitive models for fiber length, with Akaike weights of 0.51 and 0.48, respectively. The top models across all fiber attributes frequently included vegetation predictors (age, species composition, mean DBH) and the disturbance predictor (PCT). Among all the predictors, mean DBH and age were common to all high-ranking models (Mod16, Mod18 and Mod13). For balsam fir, the top models of fiber attributes varied among six candidate models: Mod12, Mod13, Mod14, Mod16, Mod17 and Mod18. Three models were included in the confidence set for wood density (Mod18, Mod16 and Mod12) and coarseness (Mod18, Mod17 and Mod13), whereas only one model was included for fiber length (Mod17) and modulus of elasticity (Mod14). The top three models for wood density had two predictors in common: mean DBH and age. For coarseness, age was the only common variable between the three models. For fiber length, the top model was a combination of geography, vegetation and disturbance factors; whereas for modulus of elasticity, the top model included geography, climate and vegetation factors.

Table 8 - Confidence set (95%)¹ for the plot level models with the highest AICc weights.

	K	AICc	ΔAICc	ω_i	R^2	Adj. R^2	RMSE	RMSE _t
Black spruce								
Wood density								
Mod16	8	736.26	0.00	0.77	0.56	0.53	25.64	4.68%
Mod18	8	737.82	1.56	0.14	0.56	0.52	25.91	4.73%

Mod13	6	740.40	4.14	0.06	0.51	0.48	27.20	4.96%
<i>Averaged predictions using all models</i>					0.57			
<i>Leave-one-out cross-validation</i>							28.88	5.28%
Coarseness								
Mod16	8	689.19	0.00	0.70	0.58	0.54	18.89	4.93%
Mod17	8	691.18	1.98	0.26	0.57	0.53	19.14	5.00%
<i>Averaged predictions using all models</i>					0.58			
<i>Leave-one-out cross-validation</i>							21.33	5.58%
Fibre length								
Mod13	6	-84.44	0.00	0.51	0.49	0.46	0.13	5.67%
Mod17	8	-84.33	0.11	0.48	0.52	0.48	0.12	5.50%
<i>Averaged predictions using all models</i>					0.52			
<i>Leave-one-out cross-validation</i>							0.14	6.19%
Modulus of elasticity								
Mod17	8	291.28	0.00	0.82	0.61	0.57	1.43	10.11%
Mod16	8	295.08	3.80	0.12	0.59	0.55	1.46	10.36%
Mod13	6	296.51	5.23	0.06	0.55	0.53	1.52	10.80%
<i>Averaged predictions using all models</i>					0.61			
<i>Leave-one-out cross-validation</i>							1.65	11.85%
Balsam fir								
Wood density								
Mod18	8	1071.26	0.00	0.58	0.45	0.42	21.87	5.13%
Mod16	8	1073.14	1.88	0.23	0.45	0.42	22.04	5.17%
Mod12	4	1073.65	2.40	0.17	0.40	0.39	22.96	5.39%
<i>Averaged predictions using all models</i>					0.45			
<i>Leave-one-out cross-validation</i>							23.39	5.50%
Coarseness								
Mod18	8	1018.97	0.00	0.78	0.34	0.31	17.49	5.03%
Mod17	8	1022.65	3.69	0.12	0.32	0.28	17.77	5.11%
Mod13	6	1023.73	4.76	0.07	0.29	0.26	18.20	5.24%
<i>Averaged predictions using all models</i>					0.35			
<i>Leave-one-out cross-validation</i>							18.66	5.38%
Fibre length								
Mod17	8	-149.47	0.00	1.00	0.46	0.43	0.12	5.31%
<i>Averaged predictions using all models</i>					0.46			
<i>Leave-one-out cross-validation</i>							0.13	5.83%
Modulus of elasticity								
Mod14	8	365.01	0.00	0.97	0.47	0.44	1.07	9.47%
<i>Averaged predictions using all models</i>					0.48			
<i>Leave-one-out cross-validation</i>							1.15	10.28%

¹ The 95% confidence set was determined by summing the Akaike weights from largest to smallest until the sum ≥ 0.95 .

K ; number of parameters including the intercept and the error term; AICc, Akaike's Information Criterion corrected for small sample size; Δ_i , AICc relative to the most parsimonious model; w_i , AICc model weight.

Given that there was substantial model selection uncertainty for most of the fiber attributes for both species, we computed model-averaged predictions based on all the models in the candidate model set (Burnham et al., 2011). Inference based on all models in the candidate set resulted in model-averaged estimates of R^2 above 0.5 for all black spruce attributes and between 0.35 and

0.48 for all balsam fir attributes. The range of values for black spruce and balsam fir was relatively distinct for wood density, coarseness, and modulus of elasticity. Only fiber length showed similar range and spread for both species. Generally, the plots revealed a small overestimation of the lower values and a small underestimation of the higher values (Fig. 6). This tendency was similar for both species.

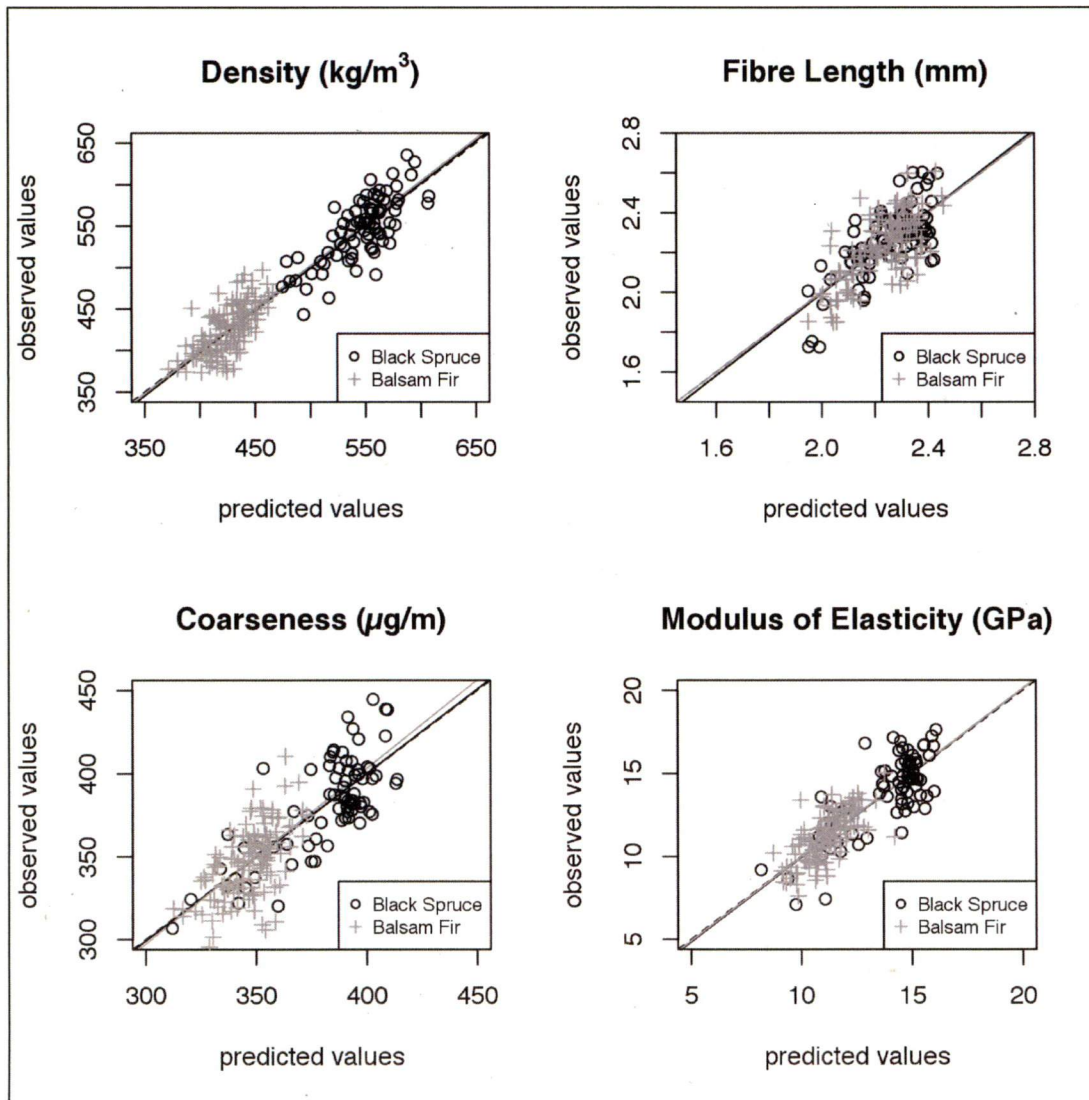


Figure 6 - Observed vs. predicted values for all fibre attributes (from plot level model averaging).

Wood density of black spruce and balsam fir varied mainly with mean DBH and age, but other variables also had an effect. Specifically, black spruce wood density increased with age and species composition (Table 9). In contrast, wood density decreased with mean DBH and annual

precipitation (Table 9). Wood density in plots having undergone PCT was lower than in plots that were not thinned (Table 9). Similarly, balsam fir wood density increased with age and decreased with mean DBH and annual precipitation (Table 9).

For coarseness, fiber length and modulus of elasticity, some explanatory variables remained important for all attributes (Table 9). For instance, age was generally a good predictor for most attributes and for both species, with only one exception (modulus of elasticity of balsam fir). In all cases, fiber attribute values increased with age. Similarly, PCT was often a good predictor, with lower fiber attribute values in the plots having undergone PCT. Furthermore, all fiber attributes of black spruce increased with species composition. In contrast, balsam fir fiber attributes did not vary with species composition, but varied with geography, climate, and disturbance variables. For example, coarseness, fiber length and modulus of elasticity of balsam fir decreased with elevation, but for black spruce, only fiber length followed the same pattern. Additionally, fiber length and coarseness decreased with latitude, whereas coarseness and modulus of elasticity increased with the mean temperature of the growing season. Although there were some common variables among the different balsam fir models, the explanatory variables varied from one attribute to another.

Prediction errors calculated using LOOCV (Table 8) gave RMSE values for black spruce of 28.9 kg/m³ (5.29%) for wood density, 21.3 µg/m (5.58%) for coarseness, 0.14 mm (6.19%) for fiber length, and 1.65 GPa (11.85%) for modulus of elasticity. RMSE for balsam fir were slightly lower at 23.4 kg/m³ (5.51%) for wood density, 18.7 µg/m (5.39%) for coarseness, 0.13 mm (5.83%) for fiber length, and 1.15 GPa (10.21%) for modulus of elasticity. These values represent less than 7% of the mean values for each attribute, except for modulus of elasticity for which percentage is a little over 10%.

Table 9 - Explanatory variables influencing plot-level fibre attributes in Newfoundland (i.e., 95% CI excludes 0). The explanatory variables are in decreasing order of predictive capability. Values in parentheses under the unconditional SE are the ratio between SE and the model-average estimates.

	Model-averaged estimate	Unconditional SE	95 % Unconditional confidence interval
Black spruce			
Wood density			
Age	0.95	0.15 (0.16)	0.65; 1.25
Mean dbh	-5.86	1.89 (0.32)	-9.57; -2.15
Annual precipitation	-0.07	0.03 (0.42)	-0.13; -0.02
PCT	-28.13	12.18 (0.43)	-52; -4.27
Species composition	0.33	0.16 (0.48)	0.02; 0.64
Coarseness			
Age	0.49	0.11 (0.22)	0.27; 0.71
Species composition	0.44	0.12 (0.27)	0.22; 0.67
PCT	-30.26	8.87 (2.93)	-47.64; -12.88
Fibre Length			
Elevation	-0.0004	0.0002 (-0.5125)	-0.0009; 2e-06
Age	0.0034	0.0007 (0.2037)	0.0020; 0.0048
Species composition	0.0020	0.0007 (0.3735)	0.0005; 0.0034
Dominant height	0.0286	0.0116 (0.4065)	0.0058; 0.0515
Modulus of elasticity			
Latitude	-0.623	0.317 (-0.509)	-1.245; -0.002
PCT	-1.943	0.670 (-0.345)	-3.256; -0.630
Species composition	0.040	0.009 (0.214)	0.023; 0.057
Age	0.032	0.009 (0.269)	0.015; 0.049
Balsam fir			
Wood density			
Mean dbh	-5.79	1.01 (0.17)	-7.77; -3.81
Age	0.56	0.11 (0.20)	0.34; 0.77
Annual precipitation	-0.04	0.02 (0.50)	-0.08; -0.01
Coarseness			
Elevation	-0.05	0.02 (0.03)	-0.08; -0.01
Age	0.37	0.09 (0.24)	0.20; 0.55
Mean temperature of growing season	10.64	3.92 (0.37)	2.96; 18.33
Latitude	-5.65	1.79 (3.86)	-9.16; -2.13
PCT	-15.04	5.29 (9.75)	-25.41; -4.66
Fibre length			
PCT	-0.0880	0.0349 (-0.3964)	-0.1564; -0.0196
Latitude	-0.0450	0.0120 (-0.2661)	-0.0685; -0.0215
Elevation	-0.0005	0.0001 (-0.2152)	-0.0007; -0.0003
Age	0.0025	0.0005 (0.2069)	0.0015; 0.0035
Dominant height	0.0204	0.0056 (0.2753)	0.0094; 0.0314
Modulus of elasticity			
Elevation	-0.004	0.001 (-0.262)	-0.006; -0.002
Mean dbh	-0.232	0.052 (-0.226)	-0.334; -0.129
Dominant height	0.323	0.063 (0.194)	0.201; 0.446
Mean temperature of growing season	0.846	0.247 (0.292)	0.362; 1.330

3.4.2 Landscape-level model selection and inference

Results obtained at the landscape level were generally similar to those from the plot-level analysis (Table 8 & 10). For black spruce, the same models were often selected but sometimes with slightly different weights. For balsam fir coarseness and fiber length, the same models were identified as the top models using both the landscape and plot-level explanatory variables. For wood density and modulus of elasticity, different sets of models ranked higher but with only subtle changes in the list of explanatory variables. The landscape-level models resulted in only slightly higher RMSE values from the plot level models for black spruce (30.6 vs 28.9 kg/m³ for wood density; 21.9 vs 21.3 μ g/m for coarseness; 1.69 vs 1.65 GPa for modulus of elasticity) and the same values for fiber length (0.14 mm). For balsam fir, RMSE values were also slightly higher for all attributes except modulus of elasticity (26.7 vs. 23.4 kg/m³ for wood density, 18.8 vs. 18.7 μ g/m for coarseness, and 1.15 vs 1.14 GPa for modulus of elasticity) and similar values for fiber length (0.13 mm). Overall, these prediction errors represent <7% of the mean values for each attribute, except for modulus of elasticity for which the percentage is a little over 10%.

The maps generated using the landscape-level models show the spatial distribution of each attribute at the island scale (Fig. 7). The main forested area of black spruce is concentrated in the central portion of the island. The general distribution of patterns related to the four fiber attributes is similar, which follows the trend given in Table 5 for the correlation between fiber attributes. The main forested area of balsam fir is in the western portion of the island and the eastern-most peninsula. The four fiber attributes have different distribution patterns although there are some similarities. The ability to map the results with the landscape-level models generally came with a small loss of prediction ability when compared with the plot-level models, as shown by the results in Table 8. The only exception was the MOE for balsam fir where prediction levels were similar.

Table 10 - Confidence set (95%) for the best fibre attributes models for black spruce and balsam fir (landscape level).

Confidence set for the best model (95% confidence set)								
	K	AICc	$\Delta AICc$	ω_i	R ²	Adj. R ²	RMSE	RMSE _r
Black spruce								
Wood density								
Mod17	8	744.64	0.00	0.66	0.51	0.47	27.08	4.94%
Mod13	6	746.57	1.94	0.25	0.47	0.44	28.31	5.17%
Mod16	8	749.65	5.01	0.05	0.48	0.44	27.97	5.11%
<i>Averaged predictions using all models</i>					0.51			
<i>Leave-one-out cross-validation</i>							30.59	5.60%
Coarseness								
Mod16	8	692.94	0.00	0.70	0.56	0.52	19.36	5.05%
Mod17	8	694.71	1.77	0.29	0.55	0.51	19.58	5.11%
<i>Averaged predictions using all models</i>					0.56			
<i>Leave-one-out cross-validation</i>							21.87	5.73%
Fibre length								
Mod17	8	-84.99	0.00	0.65	0.52	0.48	0.12	5.47%
Mod13	6	-83.62	1.37	0.33	0.48	0.45	0.13	5.70%
<i>Averaged predictions using all models</i>					0.53			
<i>Leave-one-out cross-validation</i>							0.14	6.19%
Modulus of elasticity								
Mod17	8	294.96	0.00	0.84	0.59	0.55	1.46	10.36%
Mod16	8	298.29	3.33	0.16	0.57	0.53	1.49	10.58%
<i>Averaged predictions using all models</i>					0.59			
<i>Leave-one-out cross-validation</i>							1.69	12.14%
Balsam fir								
Wood density								
Mod17	8	1102.44	0.00	0.53	0.29	0.25	24.98	5.86%
Mod18	8	1103.83	1.40	0.26	0.28	0.24	25.13	5.90%
Mod15	6	1105.02	2.58	0.14	0.24	0.22	25.76	6.05%
Mod13	6	1106.85	4.42	0.06	0.23	0.20	25.96	6.09%
<i>Averaged predictions using all models</i>					0.33			
<i>Leave-one-out cross-validation</i>							26.74	6.29%
Coarseness								
Mod18	8	1021.92	0.00	0.68	0.32	0.29	17.71	5.10%
Mod17	8	1023.45	1.53	0.32	0.32	0.28	17.83	5.13%
<i>Averaged predictions using all models</i>					0.33			
<i>Leave-one-out cross-validation</i>							18.85	5.44%
Fibre length								
Mod17	8	-145.61	0.00	1.00	0.44	0.41	0.12	5.39%
<i>Averaged predictions using all models</i>					0.44			
<i>Leave-one-out cross-validation</i>							0.13	5.83%
Modulus of elasticity								
Mod18	8	363.2	0.00	0.98	0.48	0.45	1.06	9.40%
<i>Averaged predictions using all models</i>					0.48			
<i>Leave-one-out cross-validation</i>							1.14	10.19

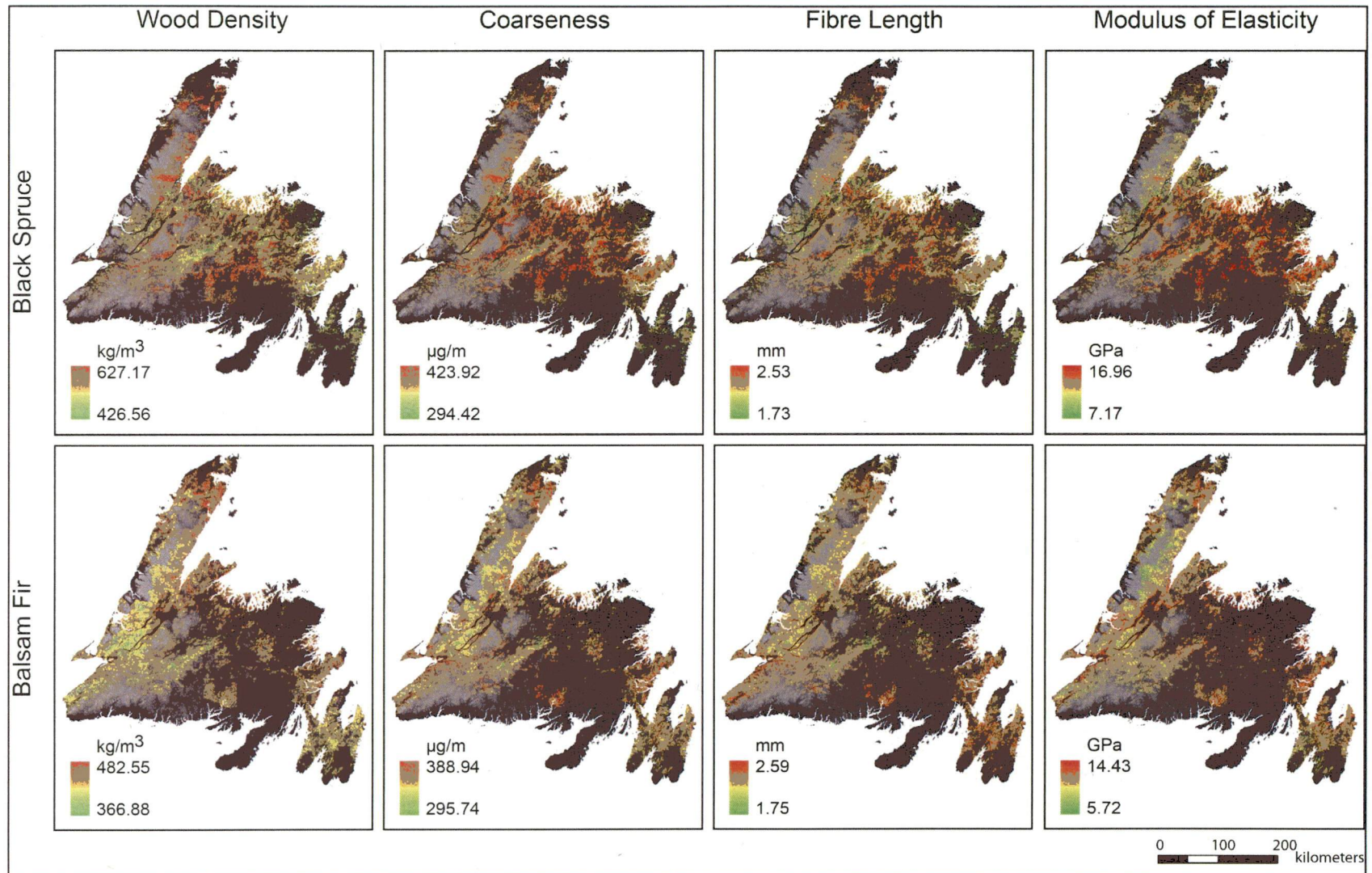


Figure 7 - Predicted spatial distribution of fibre attributes across Newfoundland for stands containing black spruce and balsam fir.

3.5 Discussion

We used model selection and multimodel inference to identify environmental and forest inventory explanatory variables and to predict wood fiber attributes at the plot and landscape levels. The coefficients of determination (R^2) for black spruce (0.52 to 0.61) and for balsam fir (0.35 to 0.48) suggested a persistent trend: predictive models always had higher R^2 for black spruce than for balsam fir. However, the predictive models for both species showed relatively similar RMSE, indicating similar predictive ability for both species. The higher R^2 for black spruce are likely the result of a greater range of values for the response variables. Regardless, our model-averaging approach showed similar capabilities to predict fiber attributes for both species.

The predictive models of the two species were primarily influenced by two explanatory variables: stand age and PCT. Stand age was also raised as a potential variable by van Leeuwen et al. (2011) under the assumption that, when trees grow older, juvenile wood reduces or disappears, which favors increasing wood density. Not surprisingly, PCT also stands out as an important predictor of fiber attributes. Stand thinning reduces competition among the remaining trees by providing a wider space to grow, resulting in increased diameter growth (MacDonald and Hubert, 2002). The effect of other, less dominant, explanatory variables varied between fiber attributes and for both species. For instance, species composition influenced all black spruce attributes, but this was not the case for balsam fir. Besides stand age and PCT, black spruce wood density was also influenced by species composition, mean DBH and annual precipitation, whereas balsam fir wood density was influenced by only three explanatory variables: stand age, mean DBH, and annual precipitation. Relationships similar to those found in this study have been reported for other tree species (Kilpeläinen et al., 2005; MacDonald and Hubert, 2002; van Leeuwen et al., 2011). The influence of mean DBH on wood fiber properties was suggested by Liu et al. (2007) when investigating yield and lumber quality. In our study, mean DBH was a significant explanatory variable but only for wood density and generally not for the other fiber attributes (with the exception of the modulus of elasticity of the balsam fir). Overall, fiber characteristics were influenced most by vegetation and disturbance variables combined with additional influences from climate and geographic variables.

The information-theoretic approach permitted a comparison of models with different types of variables and provided a measure of support for each. We used this approach over the more commonly used stepwise regression approach, as the latter can be strongly dependent on the method (backward elimination, forward selection, stepwise) and the choice of α level, does not account for multiple testing, and assumes that the analyst knows nothing about the system under study (Burnham et al., 2011; Mazerolle, 2006). In contrast, the approach used in this study relied on the specification of relevant models that reflect biologically interesting hypotheses and provided measures of support in favor of each model/hypothesis. More importantly, model selection was based on information criteria and derived measures that quantified the uncertainty regarding the best model, acknowledging that some models may be equivalent. The results suggested that for wood density and coarseness, inferences be based on the entire model set, whereas for fiber length and modulus of elasticity, a single model was adequate.

The landscape models offer several advantages as an operational tool to support forest management planning. Implementation of the models in a GIS to generate maps reveals the spatial patterns of fiber attributes across the island. If a stand contains both spruce and fir according to the stand type, the models offer separate predictions of fiber attributes for each species. Moreover, now that the models are developed, it is not necessary to go back and take core samples and measure fiber attributes in order to update the maps. Rather, once the inventory stand maps are updated, the models can be used to predict the fiber attributes.

Although this study provides models that predict how fiber attributes vary from stand to stand and across landscapes, understanding “why” fiber attributes vary is equally important. Wood fiber attributes are determined by forest and environmental factors that interact with one another in complicated ways. Understanding the nature and complexity of these interactions is important to support forest management activities geared toward the production of wood with specific characteristics. Further research is thus necessary to test specific hypotheses related to tree growth, wood formation, and the development of fiber attributes.

Several additional limitations were identified in the study suggesting further research to improve the models and their application. Despite efforts to use relevant variables, other important explanatory variables may have been missed. For example, variables describing average wind

speed, distance to the coast, soil moisture, and surficial geology may help to account for unexplained variance and improve predictions. As these variables were not available for landscape-level application, they were not pursued in this study. The analysis clearly showed the importance of variables describing the vegetation. Yet, the available explanatory variables (e.g., age, height, and crown density) provide a relatively coarse representation of structure. Some variables identified in the literature as important drivers for fiber attributes were not identified as important in the present study (i.e., stand density). The fact that the fiber trees were selected outside the plot is also a possible source of error considering that differences may exist between the trees selected and those inside the plot. Recent research has shown that a more comprehensive representation of stand structure is possible from metrics derived from light detection and ranging (LiDAR) technologies (van Leeuwen et al., 2011). Even finer scale structural metrics may be generated from terrestrial LiDAR scans combined with architectural models (Côté et al., 2012). Airborne laser scanning systems provide increasing capabilities to map detailed structural variables including mean DBH and dominant height of conifer forests (Luther et al. in review). With respect to the maps generated with the landscape-level models, we assumed that the explanatory variables available from the inventory stand maps were up to date and 100% correct. However, the inventory cycle is typically 10–15 years, meaning that the mapped information could be 10–15 years out of date. Moreover, the scale of mapping at the stand level was adequate for strategic planning, but increased precision would help to better inform operational harvest planning. Finally, although the RMSE provide a level of validation of the models, validation was not possible at the map level because validation of the input layers was not available. Advances in the availability and capabilities of airborne laser scanning systems offer increased opportunities to address current limitations in producing detailed forest structural information to support prediction and mapping of fiber attributes.

3.6 Conclusion

The results of this study show that wood fiber attributes can be modeled using explanatory variables contained in existing forest inventory systems combined with other environmental variables describing climate and geography. Our analyses showed that variables describing the vegetation (age and mean DBH) and disturbance (PCT) were important explanatory variables in all models developed at both the plot and landscape levels. Additionally, environmental variables

describing elevation, latitude, annual precipitation, and mean temperature of the growing season, were linked to many fiber attributes but to a smaller extent than the vegetation and disturbance variables. Modeled average prediction errors were less than 5% for most fiber attributes and 10% for modulus of elasticity at both the plot and landscape levels. Accordingly, the landscape-level models could be used to make spatial predictions of fiber attributes spanning wide gradients of geography and climate across the productive forest area of the island of Newfoundland with a total land area >100,000 km².

Few studies have provided guidelines on the capacity to predict wood fiber attributes at the landscape level or over large areas. The apparent dominance of the vegetation variables to predict wood fiber is useful, so further research should focus on improved measurement capability in forest inventory for these variables. Spatially explicit estimation of relevant structural variables may be a challenge to map for large areas. However, the availability of high spatial resolution satellite images and airborne LiDAR data is likely to improve our ability to apply predictive models such as those presented in this study.

Acknowledgments

This research was carried out with funding and research support provided by the “Newfoundland Fibre Project” including financial support specifically for this study from the Natural Science and Engineering Research Council of Canada (CRSNG-CRDPI-390394). The fiber attribute database was provided by FPInnovations under the Forest Industry Competitive Advantage Project led by Corner Brook Pulp and Paper Limited. The authors would like to thank all project members and are especially grateful to T. Moulton of Corner Brook Pulp and Paper Limited and W. Bowers of Grenfell Campus, Memorial University for their overall support of the project, and A. Groot of the Canadian Wood Fibre Centre for helpful discussions on modeling wood fiber attributes. Thanks also to D. McKenney and his team at Natural Resources Canada for providing climate data for the permanent sample plots and grids of climate variables for the island of Newfoundland and the Department of Natural Resources, Government of Newfoundland and Labrador, for providing the sample plot database and forest inventory stand maps. Thanks to B. Daigle and C. Simpson for editorial assistance.

References

- Bergqvist, G., Bergsten, U., Ahlqvist, B., 2000. Fibre properties of Norway spruce of different growth rates grown under birch shelterwoods of two densities. *Can. J. For. Res.* 30, 487–494.
- Bouriaud, O., Bréda, N., Mogueédec, G., Nepveu, G., 2004. Modeling variability of wood density in beech as affected by ring age, radial growth and climate. *Trees* 18, 264–276.
- Buckland, S.T., Burnham, K.P., Augustin, N.H., 1997. Model Selection: An integral part of inference. *Biometrics* 53(2), 603–618.
- Burnham, K.P., Anderson, D.R., 2002. *Model Selection and Multimodel Inference: a Practical Information-Theoretic Approach*, second edition. Springer-Verlag, New York, 488 p.
- Burnham, K.P., Anderson, D.R., 2004. Multimodel Inference: Understanding AIC and BIC in model selection. *Sociol. Method Res.* 33(2), 261–304.
- Burnham, K.P., Anderson D.R., Huyvaert K.P., 2011. AIC model selection and multimodel inference in behavioral ecology: some background, observations and comparisons. *Behav.Ecol. Sociobiol.* 65, 23–25.
- Canadian Digital Elevation Data, 2000. Canadian Digital Elevation Data—1:50 000 source scale, Government of Canada, Natural Resources Canada, Earth Sciences Sector, Centre for Topographic Information, Sherbrooke, Quebec, Canada (<http://www.geobase.ca>).

Canty, A., Ripley, B., 2012. boot: Bootstrap Functions (originally by Angelo Canty for S.) R package version 1.3-4. Available online at <http://cran.r-project.org/web/packages/boot/index.html>; last accessed May 16, 2012.

Côté, J.-F., Fournier, R.A., Frazer, G., Niemann, O., 2012. A fine-scale architectural model of trees to enhance LiDAR-derived measurements of forest canopy structure. *Agr. For. Meteorol.* 166–167, 72–85.

Delaney, B.B., Osmond, S.M., 1977. The Forest Management Inventory of Newfoundland. Department of Forestry and Agriculture, St. John's, Newfoundland, Information Report FI-5, 32 p.

Dochtermann, N.A., Jenkins, S.H., 2011. Developing multiple hypotheses in behavioral ecology. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 65(1), 37–45.

Downes, G.M., Wimmer, R., Evans, R., 2002. Understanding wood formation: gains to commercial forestry through tree-ring research. *Dendrochronologia* 20(1–2), 375–381.

Evans, R., Ilic, J. 2001. Rapid prediction of wood stiffness from microfibril angle and density. *For. Prod. J.* 51 (3), 53–57.

FPIInnovations, 2009. Wood Quality Assessment. Available at http://www.paprican.ca/wps/portal/paprican/util?lang=en&extsrc=EV_Wood_Quality_Assessment; last accessed April 24, 2013.

Government of Newfoundland and Labrador, 2011. Forest types. Available at http://www.nr.gov.nl.ca/nr/forestry/statistics/forest/forest_types.html; last accessed October 26, 2012.

Hamel, B., Bélanger, N., Paré, D., 2004. Productivity of black spruce and jack pine stands in Quebec as related to climate, site biological features and soil properties. *For. Ecol. Manag.* 191, 239–251.

Hegyí, G., Garamszegi, L. Z., 2011. Using information theory as a substitute for stepwise regression in ecology and behavior. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 65(1), 69–76.

Johnson, J.B., Omland, K.S., 2004. Model selection in ecology and evolution. *Trends Ecol. Evol.* 19(2), 101–8.

Kennedy, R.W., 1995. Coniferous wood quality in the future: concerns and strategies. *Wood Sci. Technol.* 29, 321–338.

Kilpeläinen, A., Peltola, H., Ryypö, A., Kellomäki, S., 2005. Scots pine responses to elevated temperature and carbon dioxide concentration: growth and wood properties. *Tree Physiol.* 25, 75–83.

- Lei, Y.C., Zhang, S.Y., Jiang, Z., 2005. Models for predicting lumber bending MOR and MOE based on tree and stand characteristics in black spruce. *Wood Sci. Technol.* 39, 37–47.
- Lenz, P., Bernier-Cardou, M., MacKay, J., Beaulieu, J., 2012. Can wood properties be predicted from the morphological traits of a tree? A canonical correlation study of plantation-grown white spruce. *Can. J. For. Res.* 42, 1518–1529.
- Liu, C., Zhang, S.Y., Cloutier, A., Rycabel, T., 2007. Modeling lumber bending stiffness and strength in natural black spruce stands using stand and tree characteristics. *For. Ecol. Manage.* 242, 648–655.
- Luther, J.E., Skinner, R., Fournier, R.A., van Lier, O., Bowers, W.W., Coté, J.-F., Hopkinson, C., Moulton, T., (in review). Predicting wood quantity and quality attributes of balsam fir and black spruce using airborne laser scanner data.
- MacDonald, E., Hubert, J., 2002. A review of the effects of silviculture on timber quality of Sitka spruce. *Forestry* 75, 107–138.
- MacKenzie, J., Bruemmer, G., 2009. Enhancing Canada's forest fibre. *For. Chron.* 85, 353–354.
- Mazerolle, M.J., 2006. Improving data analysis in herpetology: using Akaike's Information Criterion (AIC) to assess the strength of biological hypotheses. *Amphibia-Reptilia* 27, 169–180.
- Mazerolle, M.J., 2012. AICcmodavg: Model selection and multimodel inference based on (Q)AIC(c). R package version 1.24. Available at <http://cran.r-project.org/web/packages/AICcmodavg/index.html>; last accessed 3 May 2012.
- McKenney, D., 2006. Spatial 1971–2000 Modeled climate grids. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service – Great Lakes Forestry Centre, Landscape Analysis and Application Section, Great Lakes Forestry Centre, Canadian Forestry Service, Natural Resources Canada, Sault Ste. Marie, Ontario, Canada (<http://gmaps.nrcan.gc.ca>).
- McKenney, D., Papadopol, P., Lawrence, K., Campbell, K., Hutchinson, M., 2007. Customized spatial climate models for Canada. *Frontline* 108, 1–8.
- Mullins, E.J., McKnight, T.S., (1981). *Canadian Woods: Their Properties and Uses*. University of Toronto Press, Toronto, Canada. 389 p.
- Newfoundland Forest Service, 1991. FORMAP Geographic information system database catalogue. Government of Newfoundland and Labrador, Department of Forestry and Agriculture, Forest Management Division, 43 p.
- Newfoundland Forest Service, 2011. Permanent Sample Plot Program Procedures and Specifications. Newfoundland Forest Service, Forest Ecosystem Management Division, 2011 Revision, 110 p.

- Pitt, D., Pineau, J., 2009 Forest inventory research at the Canadian Wood Fibre Centre: Notes from a research coordination workshop, June 3-4, 2009, Pointe Claire, QC. *For. Chron.* 85(6). 859–869.
- Posada, D., Buckley, T.R., 2004. Model selection and model averaging in phylogenetics: advantages of Akaike information criterion and Bayesian approaches over likelihood ratio tests. *Syst. Biol.* 53(5), 793–808.
- R Development Core Team, 2012. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Available at <http://www.R-project.org/>; last accessed May 16, 2012.
- Richards, S.A., Whittingham, M.J., Stephens, P.A., 2011. Model selection and model averaging in behavioral ecology: the utility of the IT-AIC framework. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 65, 77–89.
- Rowe, J.S., 1972. Forest Regions of Canada. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service - HQ, Pub No 1300, Ottawa, Canada. 172 p.
- Schimleck, L.R., Evans, R., 2004. Estimation of *Pinus radiata* D. Don tracheid morphological characteristics by near infrared spectroscopy. *Holzforschung* 58, 66–73.
- Schimleck, L.R., Evans, R., Matheson, A.C., 2002. Estimation of *Pinus radiata* D. Don clear wood properties by near-infrared spectroscopy. *J. Wood Sci.* 48, 132–137.
- Sherson, G.E., Woo, K.L., Jang, H.F., Huntley, S., Drummond, J., Lawrence, V., Gomes, F., 2007. From forest to product: new solutions for rapid, comprehensive wood and fibre analyses. III ICEP - International Colloquium on Eucalyptus Pulp. p.12.
- Stage, A.R., 1976. Interactions of elevation, aspect, and slope in models of forest species composition and productivity. *For. Sci.* 22, 457–460.
- Stone, M., 1974. Cross-validated choice and assessment of statistical predictions. *J. Roy. Stat. Soc. B. Met.* 36(2), 111–147.
- Swenson, N.G., Enquist, B.J., 2007. Ecological and evolutionary determinants of a key plant functional trait: wood density and its community - wide variation across latitude and elevation. *Am. J. Bot.* 94(3), 451–459.
- USDA Forest Service, 1990. *Sylvics of North America*, Volume 1: Conifers. Available online at http://www.na.fs.fed.us/spfo/pubs/silvics_manual/table_of_contents.htm; last accessed October 26, 2012.
- van Leeuwen, M., Hilker, T., Coops, N.C., Frazer, G., Wulder, M.A., Newnham, G.J., Culvenor, D.S., 2011. Assessment of standing wood and fiber quality using ground and airborne laser scanning: A review. *For. Ecol. Manage.* 261, 1467–1478.

- Watson, P., Bradley, M., 2009. Canadian pulp fibre morphology: superiority and considerations for end use potential. *For. Chron.* 85, 401–408.
- Watt, M.S., Clinton, P.W., Coker, G., Davis, M.R., Simcock, R., Parfitt, R.L., Dando, J., 2008a. Modeling the influence of environment and stand characteristics on basic density and modulus of elasticity for young *Pinus radiata* and *Cupressus lusitanica*. *For. Ecol. Manage.* 255, 1023–1033.
- Watt, M.S., D'Ath, R., Leckie, A.C., Clinton, P.W., Coker, G., Davis, M.R., Simcock, R., Parfitt, R.L., Dando, J., Mason, E.G., 2008b. Modeling the influence of stand structural, edaphic and climatic influences on juvenile *Pinus radiata* fibre length. *For. Ecol. Manage.* 254, 166–177.
- Wilhelmsson, L., Arlinger, J., Spångberg, K., Lundqvist, S.-O., Grahn, T., Hedenberg, O., Olsson, L., 2002. Models for predicting wood properties in stems of *Picea abies* and *Pinus sylvestris* in Sweden. *Scand. J. For. Res.* 17, 330–350.
- Wimmer, R., Downes, G.M., Evans, R., 2002. Temporal variation of microfibril angle in *Eucalyptus nitens* grown in different irrigation regimes. *Tree Physiol.* 22, 449–57.
- Zhang, S.Y., Chauret, G., Haiqing, Q.R., Desjardins, R., 2002. Impact of initial spacing on plantation black spruce lumber grade yield, bending properties, and MSR yield. *Wood Fibre Sci.* 34(3), 460–475.
- Zobel, B.J., van Buijtenen, J.P., 1989. *Wood Variation: Its Causes and Control*. Springer-Verlag, Berlin, Germany. 419 p.

4 Résultats complémentaires

En regard des résultats obtenus pour les quatre attributs de fibre de bois traités dans le manuscrit (densité du bois, masse linéique, longueur des fibres et module d'élasticité), il est possible de remarquer une similitude dans les résultats, principalement lorsqu'il est question de l'épinette noire. Au niveau des données placette et des données cartographiques à l'échelle du paysage, pour l'épinette noire, ce sont les modèles 16, 17 et 13 qui ont été sélectionnés le plus souvent dans l'intervalle de confiance : c'est-à-dire où l'ensemble des « meilleurs modèles » procurent une somme des poids d'Akaike supérieure à 0,95. Pour améliorer la capacité prédictive des modèles et réduire le biais associé, l'inférence multimodèle a été utilisée et les coefficients de variation associés ont donné des valeurs de R^2 qui se situent entre 0,52 et 0,61 au niveau des données placette et entre 0,51 et 0,59 au niveau des données cartographiques à l'échelle du paysage, pour l'épinette noire. Pour le sapin baumier, la tendance est un peu moins claire, mais tant au niveau des données placette qu'au niveau des données cartographiques du paysage, les modèles 18 et 17 sont fréquemment identifiés dans l'intervalle de confiance. Pour le sapin baumier, les coefficients de variation (R^2) obtenus pour l'inférence multimodèle se situent entre 0,35 et 0,48 au niveau des données placette et entre 0,33 et 0,48 au niveau des données cartographiques du paysage, pour l'épinette noire. Parmi les variables d'importance, les variables d'âge, d'élévation et d'éclaircie précommerciale sont de manière générale celles qui influencent le plus les attributs de la fibre de bois. Dans tous les cas, les résultats de la validation croisée donnent des valeurs d'erreur quadratique moyenne (RMSE) assez semblables à celles obtenues pour les modèles individuels avec différences inférieures à 10 % (sauf quelques exceptions).

4.1 Analyse des attributs de fibres supplémentaires

La rédaction du manuscrit a permis d'étudier en profondeur quatre attributs de la fibre de bois, jugés comme étant les plus importants pour l'industrie. La sélection de modèles a permis d'identifier les modèles étant le mieux supportés par les données, pour prédire les attributs de la fibre. Cependant, quatre autres attributs de fibre ont été mesurés et il est intéressant d'établir leur importance : angle des microfibrilles, épaisseur de la paroi des cellules, surface spécifique et périmètre des cellules. Dans cette section du mémoire, les résultats obtenus pour ces quatre attributs sont décrits en détail, les différentes analyses réalisées y sont également présentées. Le

tableau 11, présente les résultats de la sélection de modèles pour les différents attributs de la fibre de bois au niveau des données placette pour l'épinette noire, tandis que le tableau 12 présente ceux pour le sapin baumier. L'ensemble des coefficients Bêta des modèles faisant partie de l'intervalle de confiance de 95 % se retrouve à l'annexe 5. Les modèles sélectionnés représentent les modèles identifiés comme étant les mieux supportés par les données (valeur du $\Delta AICc$ la plus basse) et faisant partie de l'ensemble de confiance de 95 %. Les tests de variance non constante (NCV) et Shapiro-Wilk ont été effectués pour déterminer la normalité et l'homoscédasticité des modèles. Il faut noter que certains modèles ont des valeurs NCV et Shapiro-Wilk inférieures aux seuils acceptables (0,05), mais les graphiques de diagnostics (annexe 6) ne montrent pas de valeurs extrêmes ou de problèmes sérieux concernant la linéarité, la normalité, l'homoscédasticité et les valeurs extrêmes. Les résultats associés à ces modèles sont donc présentés, il s'agit de les considérer avec prudence.

Tableau 11 - Ensembles de confiance pour les attributs de fibre de bois de l'épinette noire (placette)

Ensemble de confiance des meilleurs modèles (95 %)										
	K	AICc	$\Delta AICc$	ω_i	R ²	Adj. R ²	RMSE	RMSE _r	NCV	Shapiro
Angle des microfibrilles										
mod17	8	354,39	0,00	0,99	0,57	0,53	2,15	13,52%	0,00*	0,29
<i>Prédictions pondérées de l'ensemble des modèles</i>					0,57					
<i>Validation croisée</i>							2,49	16,01%		
Épaisseur de la paroi des cellules										
mod16	8	-72,76	0,00	0,88	0,61	0,58	0,13	4,98%	0,52	0,95
mod17	8	-67,27	5,49	0,06	0,58	0,55	0,14	5,16%	0,51	0,89
mod13	6	-66,23	6,53	0,03	0,55	0,52	0,14	5,36%	0,63	0,64
<i>Prédictions pondérées de l'ensemble des modèles</i>					0,61					
<i>Validation croisée</i>							0,15	5,58%		
Surface spécifique										
mod16	8	630,07	0,00	0,89	0,63	0,60	12,87	4,35%	0,98	0,92
mod17	8	634,96	4,90	0,08	0,61	0,57	13,28	4,49%	0,93	0,99
<i>Prédictions pondérées de l'ensemble des modèles</i>					0,63					
<i>Validation croisée</i>							14,51	4,92%		
Périmètre de la cellule										
mod6	3	354,26	0,00	0,33	0,15	0,13	2,32	2,15%	0,70	0,80
mod17	8	354,54	0,28	0,28	0,26	0,20	2,15	2,00%	0,56	0,80
mod13	6	355,02	0,76	0,22	0,21	0,17	2,23	2,07%	0,14	0,99
mod14	8	357,59	3,33	0,06	0,23	0,17	2,19	2,04%	0,26	0,98
mod16	8	358,14	3,88	0,05	0,23	0,16	2,20	2,04%	0,42	0,93
mod7	3	360,92	6,66	0,01	0,07	0,06	2,42	2,25%	0,57	0,63
<i>Prédictions pondérées de l'ensemble des modèles</i>					0,25					
<i>Validation croisée</i>							2,41	2,24%		

* Valeur inférieure aux seuils statistiques acceptables

Pour chacun des attributs de la fibre de bois, l'inférence multimodèle a été utilisée afin de calculer une prédiction tenant compte de tous les modèles, les valeurs du R^2 ne sont pas toujours améliorées dans les cas d'inférence multimodèle. Afin de valider les résultats de la modélisation, une procédure de validation croisée a été utilisée et les résultats de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) sont présentés dans les tableaux 11 et 12. Les valeurs du RMSE de la validation croisée sont généralement plus élevées que les valeurs du RMSE observées pour les modèles de l'intervalle de confiance. Toutefois, les valeurs sont assez semblables dans tous les cas.

Tableau 12 - Ensembles de confiance pour les attributs de fibre de bois du sapin baumier (placette)

Ensemble de confiance des meilleurs modèles (95 %)										
	K	AICc	Δ AICc	ω_i	R^2	Adj. R^2	RMSE	RMSE _c	NCV	Shapiro
Angle des microfibrilles										
mod14	8	461,98	0,00	0,79	0,53	0,50	1,62	11,01%	0,16	<0,01*
mod17	8	464,57	2,59	0,21	0,52	0,49	1,64	11,13%	0,24	<0,01*
<i>Prédictions pondérées de l'ensemble des modèles</i>					0,53					
<i>Validation croisée</i>							1,73	11,93%		
Épaisseur de la paroi des cellules										
mod18	8	-161,00	0,00	0,80	0,42	0,39	0,11	5,14%	0,14	0,91
mod16	8	-156,77	4,23	0,10	0,40	0,36	0,11	5,23%	0,26	0,54
mod12	4	-155,73	5,27	0,06	0,34	0,33	0,12	5,46%	0,40	0,83
<i>Prédictions pondérées de l'ensemble des modèles</i>					0,42					
<i>Validation croisée</i>							0,12	5,48%		
Surface spécifique										
mod18	8	1008,04	0,00	0,97	0,41	0,38	16,69	4,65%	0,35	0,15
<i>Prédictions pondérées de l'ensemble des modèles</i>					0,41					
<i>Validation croisée</i>							17,79	4,96%		
Périmètre de la cellule										
mod14	8	546,50	0,00	0,99	0,45	0,42	2,32	1,99%	0,96	0,11
<i>Prédictions pondérées de l'ensemble des modèles</i>					0,45					
<i>Validation croisée</i>							2,47	2,11%		

* Valeur inférieure aux seuils statistiques acceptables

Lorsque les valeurs observées et prédites de l'inférence multimodèle sont comparées, aucune valeur extrême n'est détectée (figure 8). Pour la variable du périmètre de la cellule, les valeurs inférieures de l'épinette noire sont sous-estimées alors que les valeurs plus élevées ont plutôt tendance à être surestimées. Pour les autres variables, le nuage de points suit de près la ligne pointillée 1:1. Il est aussi possible de remarquer que l'intervalle des valeurs de l'épinette noire est généralement inférieur à celui du sapin baumier, sauf pour l'épaisseur de la paroi des cellules, où les valeurs du sapin sont inférieures et pour l'angle des microfibrilles, où l'intervalle est similaire.

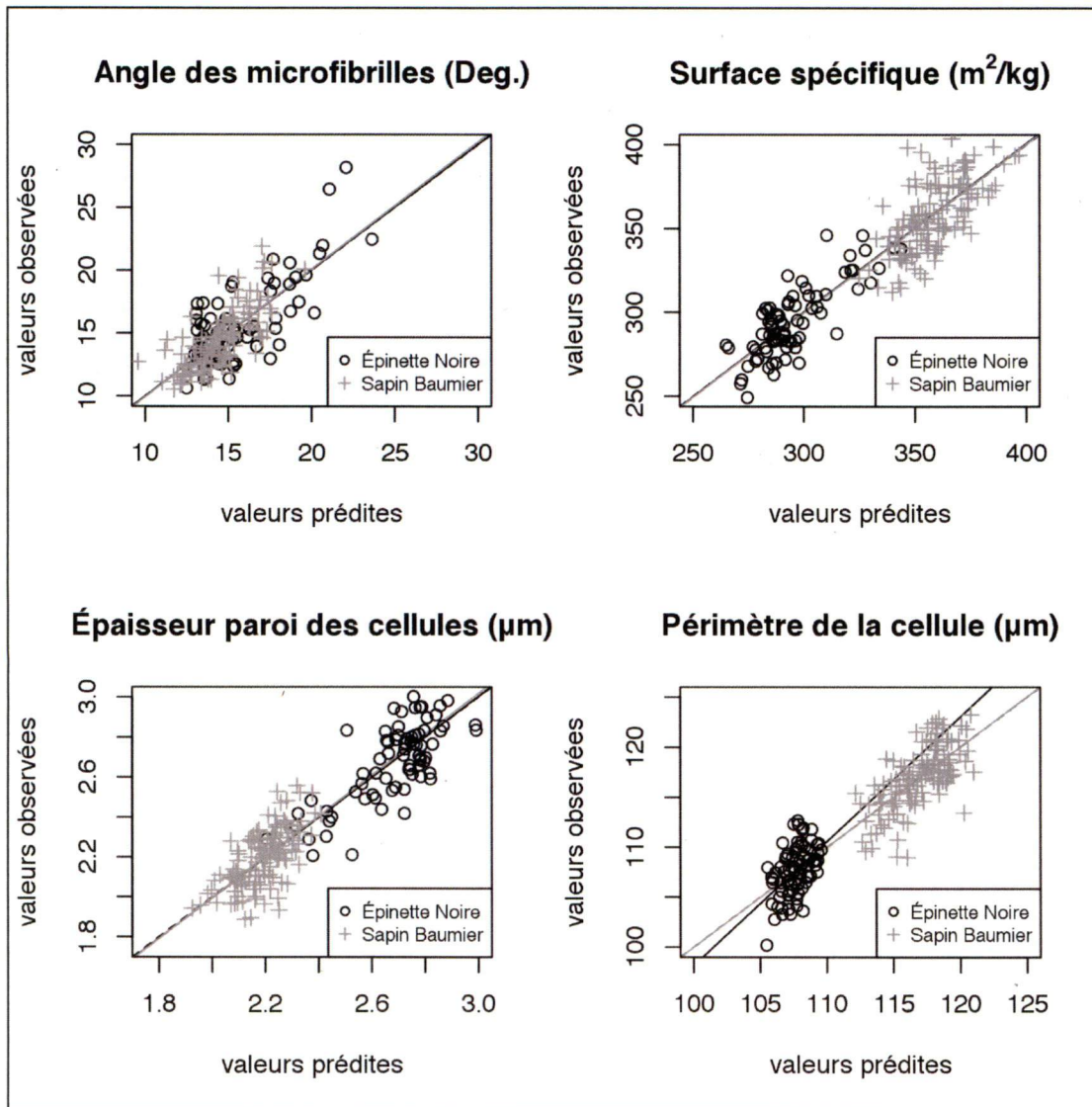


Figure 8 - Valeurs observées vs prédites pour les attributs de la fibre de bois (inférence multimodèle à l'échelle de la placette)

4.1.1 Angle des microfibrilles

Pour l'épinette noire, avec les données placette, un seul modèle a été sélectionné dans l'intervalle de confiance de 95 % pour prédire l'angle des microfibrilles, toutefois la valeur pour le test NCV est inférieure à 0,05 (tableau 11). C'est le modèle 17 qui a été identifié comme étant le modèle le plus prédictif, avec un poids d'Akaike (ω_i) de 99 %. L'inférence multimodèle n'a pas permis d'augmenter la valeur du R^2 . Le modèle 17 est composé de variables géographiques, des données de végétation et de la variable éclaircie précommerciale. Parmi les modèles sélectionnés, certaines variables ont été identifiées comme étant des variables d'importance, soit : la

composition en espèces, la latitude, la classe d'âge et l'élévation (tableau 13). Les variables qui présentaient un intervalle de confiance qui incluait « 0 » ont été retirées, leur capacité prédictive n'étant pas significative. Les variables d'importance sont classées en fonction du ratio de l'erreur standard inconditionnelle et de l'estimation du modèle pondérée.

Pour le sapin baumier, le modèle 14 a été identifié comme ayant la meilleure capacité prédictive avec un poids d'Akaike (ω_i) de 79 %. Le modèle 17 complète l'intervalle de confiance de 95 %, cependant, la valeur du test de Shapiro-Wilk est inférieure à 0,01 pour les deux modèles (tableau 12). Le modèle 14 comprend des variables géographiques, climatiques et des données de végétation. Les variables d'importance sont plus nombreuses pour le sapin baumier et il s'agit de l'élévation, la latitude, de la hauteur dominante, de la température moyenne durant la saison de croissance (SC) et de la composition en espèces (tableau 13).

Les erreurs de prédictions calculées à partir de la validation croisée ont donné les valeurs suivantes : 2,49 degrés (16,01 %) pour l'épinette noire et 1,73 degré (11,93 %) pour le sapin baumier.

Tableau 13 - Importance des variables explicatives pour la prédiction de l'angle des microfibrilles (placette)

	Estimation du modèle pondérée	Erreur standard Inconditionnelle	Intervalle de confiance inconditionnel (95 %)
Épinette noire			
Composition en espèces	-0,053462	0,012647 (0,237)	-0,078251; -0,028674
Latitude	1,618509	0,478022 (0,295)	0,681603; 2,555415
Classe d'âge	-0,037295	0,012575 (0,337)	-0,061941; -0,012648
Élévation	0,009069	0,003881 (0,428)	0,001462; 0,016675
Sapin baumier			
Élévation	0,011777	0,001462 (0,124)	0,008911; 0,014643
Latitude	0,749036	0,165186 (0,221)	0,425278; 1,072793
Hauteur dominante	-0,412484	0,095157 (0,231)	-0,598989; -0,225979
Température moyenne (SC)	-1,33348	0,36174 (0,271)	-2,042477; -0,624483
Composition en espèces	-0,021807	0,009862 (0,452)	-0,041136; -0,002479

* Les variables explicatives sont en ordre décroissant de capacité prédictive.

** Les valeurs entre parenthèses représentent le ratio entre l'erreur standard et l'estimation du modèle pondérée

4.1.2 Épaisseur de la paroi des cellules

Au niveau des données placette, trois modèles ont été sélectionnés dans l'intervalle de confiance de 95 % pour l'épinette noire (tableau 11). Le modèle 16 (avec un poids d'Akaike (ω_i) de 88 %) est celui qui offre la meilleure capacité prédictive. Il est composé de variables climatiques, de données de végétation et de la variable éclaircie précommerciale. Les modèles 17 et 13

complètent l'intervalle de confiance de 95 %. Les variables d'importance identifiées pour prédire l'épaisseur de la paroi des cellules sont dans l'ordre : la classe d'âge, la composition en espèces, l'éclaircie précommerciale, le diamètre à hauteur de poitrine et les précipitations annuelles (tableau 14).

Pour ce qui est du sapin baumier, le modèle 18 est celui qui présente le poids d'Akaike (ω_i) le plus élevé (80 %) (tableau 12). Le modèle 18 est le modèle global qui contient tous les types de variables possibles. Les modèles 16 et 12 complètent l'intervalle de confiance de 95 %. Les variables d'importance identifiées sont : la classe d'âge, le diamètre à hauteur de poitrine, l'élévation, l'éclaircie précommerciale et la température moyenne de la saison de croissance (tableau 14).

Pour l'épaisseur de la paroi des cellules, les erreurs de prédictions calculées à partir de la validation croisée ont donné pour l'épinette noire la valeur de 0,15 μm (5,58 %) et pour le sapin baumier la valeur de 0,12 μm (5,48 %).

Tableau 14 - Importance des variables explicatives pour la prédiction de l'épaisseur de la paroi des cellules (placette)

	Estimation du modèle pondérée	Erreur standard Inconditionnelle	Intervalle de confiance inconditionnel (95 %)
Épinette noire			
Classe d'âge	0,004665	0,000795 (0,170)	0,003107; 0,006223
Composition en espèces	0,002544	0,00082 (0,322)	0,000936; 0,004152
Éclaircie précommerciale	-0,193011	0,062817 (0,325)	-0,316131; -0,069891
Diamètre à hauteur de poitrine	-0,022168	0,009346 (0,422)	-0,040486; -0,00385
Précipitations annuelles	-0,000323	0,000152 (0,471)	-0,000622; -0,000025
Sapin baumier			
Classe d'âge	0,00293	0,000556 (0,190)	0,001841; 0,004019
Diamètre à hauteur de poitrine	-0,022881	0,005604 (0,245)	-0,033864; -0,011898
Élévation	-0,000233	0,000103 (0,442)	-0,000434; -0,000032
Éclaircie précommerciale	-0,074465	0,034002(0,456)	-0,141108; -0,007821
Température moyenne (SC)	0,050106	0,025353 (0,506)	0,000415; 0,099798

* Les variables explicatives sont en ordre décroissant de capacité prédictive.

** Les valeurs entre parenthèses représentent le ratio entre l'erreur standard et l'estimation du modèle pondérée

4.1.3 Surface spécifique

Pour l'épinette noire, au niveau des données placette, deux modèles ont été identifiés dans l'intervalle de confiance de 95 % (tableau 11). Le modèle 16 est celui qui a le plus important poids d'Akaike (ω_i), soit 89 % et le modèle 17 complète l'intervalle de confiance. Le modèle 16 comprend des variables climatiques, des données de végétation et la variable éclaircie

précommerciale. Parmi les variables explicatives, celles qui ont été identifiées comme étant les plus importantes sont : la classe d'âge, la composition en espèces, l'éclaircie précommerciale, les précipitations annuelles et le diamètre à hauteur de poitrine (tableau 15).

Pour le sapin baumier, seul le modèle 18 a été identifié dans l'intervalle de confiance, avec un poids d'Akaike (ω_i) de 97 % (tableau 12). Il s'agit du modèle global, qui inclut des variables de toutes les catégories. Celles ayant été identifiées comme variables d'importance sont : la classe d'âge, le diamètre à hauteur de poitrine, l'élévation et l'éclaircie précommerciale (tableau 15).

Les erreurs de prédictions pour la surface spécifique ont donné les résultats suivant : 14,51 m²/kg (4,92 %) pour l'épinette noire et 17,79 m²/kg (4,96 %) pour le sapin baumier.

Tableau 15 - Importance des variables explicatives pour la prédiction de la surface spécifique (placette)

	Estimation du modèle pondérée	Erreur standard Inconditionnelle	Intervalle de confiance inconditionnel (95 %)
Épinette noire			
Classe d'âge	-0,446967	0,075678 (0,169)	-0,595293; -0,298641
Composition en espèces	-0,291897	0,078243 (0,268)	-0,44525; -0,138544
Éclaircie précommerciale	19,43981	6,016553 (0,309)	7,647584; 31,23204
Précipitations annuelles	0,033383	0,014584 (0,437)	0,004799; 0,061967
Diamètre à hauteur de poitrine	1,957451	0,888816 (0,454)	0,215404; 3,699497
Sapin baumier			
Classe d'âge	-0,416143	0,081272 (0,195)	-0,575433; -0,256853
Diamètre à hauteur de poitrine	2,911559	0,719644 (0,247)	1,501083; 4,322034
Élévation	0,048975	0,015189 (0,310)	0,019206; 0,078744
Éclaircie précommerciale	11,96417	5,018209 (0,419)	2,128657; 21,79968

* Les variables explicatives sont en ordre décroissant de capacité prédictive.

** Les valeurs entre parenthèses représentent le ratio entre l'erreur standard et l'estimation du modèle pondérée

4.1.4 Périmètre de la cellule

Au niveau des données placette, six modèles font partie de l'intervalle de confiance de 95 % pour prédire le périmètre de la cellule (tableau 11). Il s'agit tout d'abord du modèle 6, avec un poids d'Akaike (ω_i) de 33 %, qui est en fait la variable hauteur dominante. Les modèles 17 et 13 ont des poids d'Akaike respectifs de 28 % et 22 %, tandis que les modèles 14, 16 et 17 complètent l'intervalle de confiance de 95 % avec des poids d'Akaike combinés de 12 %. Seulement deux variables d'importance ont été identifiées dans ces modèles, soit : la hauteur dominante et la composition en espèces du peuplement (tableau 16).

Pour le sapin baumier, seul le modèle 14 a été identifié dans l'intervalle de confiance, avec un poids d'Akaike (ω_i) de 99 % (tableau 12). Le modèle 14 contient des variables géographiques, climatiques et de végétation. Seulement deux variables d'importance sont à noter : les précipitations annuelles et la hauteur dominante du peuplement (tableau 16).

Pour le périmètre de la cellule, les erreurs de prédictions calculées à partir de la validation croisée ont donné pour l'épinette noire la valeur de 2,41 μm (2,24 %) et pour le sapin baumier la valeur de 2,47 μm (2,11 %).

Tableau 16 - Importance des variables explicatives pour la prédiction du périmètre de la cellule (placette)

	Estimation du modèle pondérée	Erreur standard Inconditionnelle	Intervalle de confiance inconditionnel (95 %)
Épinette noire			
Hauteur dominante	0,477097	0,157261 (0,330)	0,168872; 0,785322
Composition en espèces	0,028178	0,012347 (0,438)	0,003977; 0,052378
Sapin baumier			
Précipitations annuelles	0,007745	0,001794 (0,232)	0,004229; 0,01126
Hauteur dominante	0,572969	0,136963 (0,239)	0,304527; 0,841411

* Les variables explicatives sont en ordre décroissant de capacité prédictive.

** Les valeurs entre parenthèses représentent le ratio entre l'erreur standard et l'estimation du modèle pondérée

4.2 Modélisation au niveau cartographique du paysage

Au niveau des données cartographiques du paysage, le même processus de sélection de modèles a été utilisé pour identifier les modèles ayant le meilleur support pour prédire les différents attributs de la fibre de bois (tableaux 17 et 18).

Tableau 17 - Ensembles de confiance pour les attributs de fibre de bois de l'épinette noire (paysage)

Ensemble de confiance des meilleurs modèles (95 %)										
	K	AICc	Δ AICc	ω_i	R ²	Adj. R ²	RMSE	RMSE _c	NCV	Shapiro
Angle des microfibrilles										
mod17	8	355,00	0,00	0,99	0,57	0,53	2,16	13,57%	<0,01*	0,17
<i>Prédictions pondérées de l'ensemble des modèles</i>					0,57					
<i>Validation croisée</i>							2,50	16,08%		
Épaisseur de la paroi des cellules										
mod16	8	-63,30	0,00	0,49	0,56	0,52	0,14	5,29%	0,57	0,43
mod17	8	-63,21	0,08	0,47	0,56	0,52	0,14	5,22%	0,49	0,96
<i>Prédictions pondérées de l'ensemble des modèles</i>					0,57					
<i>Validation croisée</i>							0,16	5,95%		
Surface spécifique										
mod17	8	638,96	0,00	0,52	0,59	0,55	13,63	4,61%	0,85	0,91
mod16	8	639,25	0,29	0,45	0,59	0,55	13,66	4,62%	0,95	0,87
<i>Prédictions pondérées de l'ensemble des modèles</i>					0,59					
<i>Validation croisée</i>							15,41	5,23%		
Périmètre de la cellule										
mod13	6	349,21	0,00	0,54	0,27	0,23	2,14	1,99%	0,45	0,94
mod17	8	350,62	1,41	0,27	0,30	0,24	2,10	1,95%	0,54	0,88
mod6	3	351,36	2,14	0,18	0,18	0,17	2,27	2,11%	0,63	0,70
<i>Prédictions pondérées de l'ensemble des modèles</i>					0,28					
<i>Validation croisée</i>							2,34	2,17%		

* Valeur inférieure aux seuils statistiques acceptables

Dans le cas de l'épinette noire, les modèles sélectionnés au niveau cartographique du paysage sont assez similaires à ceux sélectionnés au niveau des données placette. Dans le cas de l'angle des microfibrilles, le modèle 17 est le seul modèle identifié dans l'intervalle de confiance, avec un poids d'Akaike (ω_i) de 99 %. Pour l'épaisseur de la paroi des cellules, les modèles 16 et 17 sont les modèles ayant les poids d'Akaike les plus élevés (respectivement 49 % et 47 %). Dans le cas de la surface spécifique, les modèles 17 et 16 sont ceux qui font partie de l'intervalle de confiance de 95 %, avec des poids d'Akaike assez semblables de 52 % et 45 %. Finalement, pour le périmètre de la cellule, le modèle 13 est celui ayant le poids d'Akaike le plus élevé (54 %). Les modèles 17 et 6 sont ceux qui complètent l'intervalle de confiance de 95 %. Les erreurs de prédictions calculées à partir de la validation croisée ont donné les valeurs suivantes pour l'épinette noire : 2,50 degrés (16,08 %) pour l'angle des microfibrilles, 0,16 μm (5,95 %) pour l'épaisseur de la paroi des cellules, 15,41 m^2/kg (5,23 %) pour la surface spécifique et 2,34 μm (2,17 %) pour le périmètre de la cellule.

Tableau 18 - Ensembles de confiance pour les attributs de fibre de bois du sapin baumier (paysage)

Ensemble de confiance des meilleurs modèles (95 %)										
	K	AICc	Δ AICc	ω_i	R ²	Adj. R ²	RMSE	RMSE _c	NCV	Shapiro
Angle des microfibrilles										
mod14	8	464,63	0,00	1,00	0,52	0,49	1,64	11,14%	0,01*	<0,01*
<i>Prédictions pondérées de l'ensemble des modèles</i>					0,52					
<i>Validation croisée</i>							1,75	12,07%		
Épaisseur de la paroi des cellules										
mod18	8	-141,59	0,00	0,88	0,31	0,28	0,12	5,58%	0,08	0,94
mod17	8	-136,96	4,63	0,09	0,29	0,25	0,13	5,69%	0,20	0,40
<i>Prédictions pondérées de l'ensemble des modèles</i>					0,32					
<i>Validation croisée</i>							0,13	5,94%		
Surface spécifique										
mod18	8	1023,92	0,00	0,62	0,33	0,29	17,86	4,98%	0,16	0,57
mod17	8	1025,00	1,08	0,36	0,32	0,29	17,95	5,00%	0,19	0,30
<i>Prédictions pondérées de l'ensemble des modèles</i>					0,34					
<i>Validation croisée</i>							19,05	5,32%		
Périmètre de la cellule										
mod14	8	559,35	0,00	0,90	0,39	0,35	2,45	2,10%	0,16	0,65
mod17	8	563,86	4,51	0,09	0,36	0,33	2,50	2,14%	0,53	0,31
<i>Prédictions pondérées de l'ensemble des modèles</i>					0,39					
<i>Validation croisée</i>							2,60	2,22%		

* Valeur inférieure aux seuils statistiques acceptables

Pour le sapin baumier, au niveau des données cartographique du paysage, tous les modèles ayant le poids d'Akaike (ω_i) le plus élevé sont les mêmes que ceux identifiés au niveau des données placette. Pour l'angle des microfibrilles, le modèle 14 est le seul identifié, avec un poids d'Akaike de 100 %. Les modèles identifiés dans l'intervalle de confiance de 95 % pour l'épaisseur de la paroi des cellules sont les modèles 18 et 17 avec des poids d'Akaike de 88 % et 9 %. Pour la surface spécifique, ce sont également les modèles 18 et 17 qui sont identifiés dans l'intervalle de confiance, avec des poids d'Akaike de 62 % et 36 % respectivement. Finalement, les modèles de prédictions choisis pour le périmètre de la cellule sont : le modèle 14 avec, un poids d'Akaike de 90 % et le modèle 17, qui complète l'intervalle de confiance avec un poids d'Akaike de 9 %. Les erreurs de prédictions calculées à partir de la validation croisée ont donné les valeurs suivantes pour le sapin baumier : 1,75 degré (12,07 %) pour l'angle des microfibrilles, 0,13 μm (5,94 %) pour l'épaisseur de la paroi des cellules, 19,05 m^2/kg (5,32 %) pour la surface spécifique et 2,60 μm (2,22 %) pour le périmètre de la cellule.

Lorsque comparées, les valeurs observées et prédites de l'inférence multimodèle (figure 9) ne montrent pas de valeurs extrêmes, ni de biais considérable, le nuage de points étant généralement près de la droite pointillée 1:1.

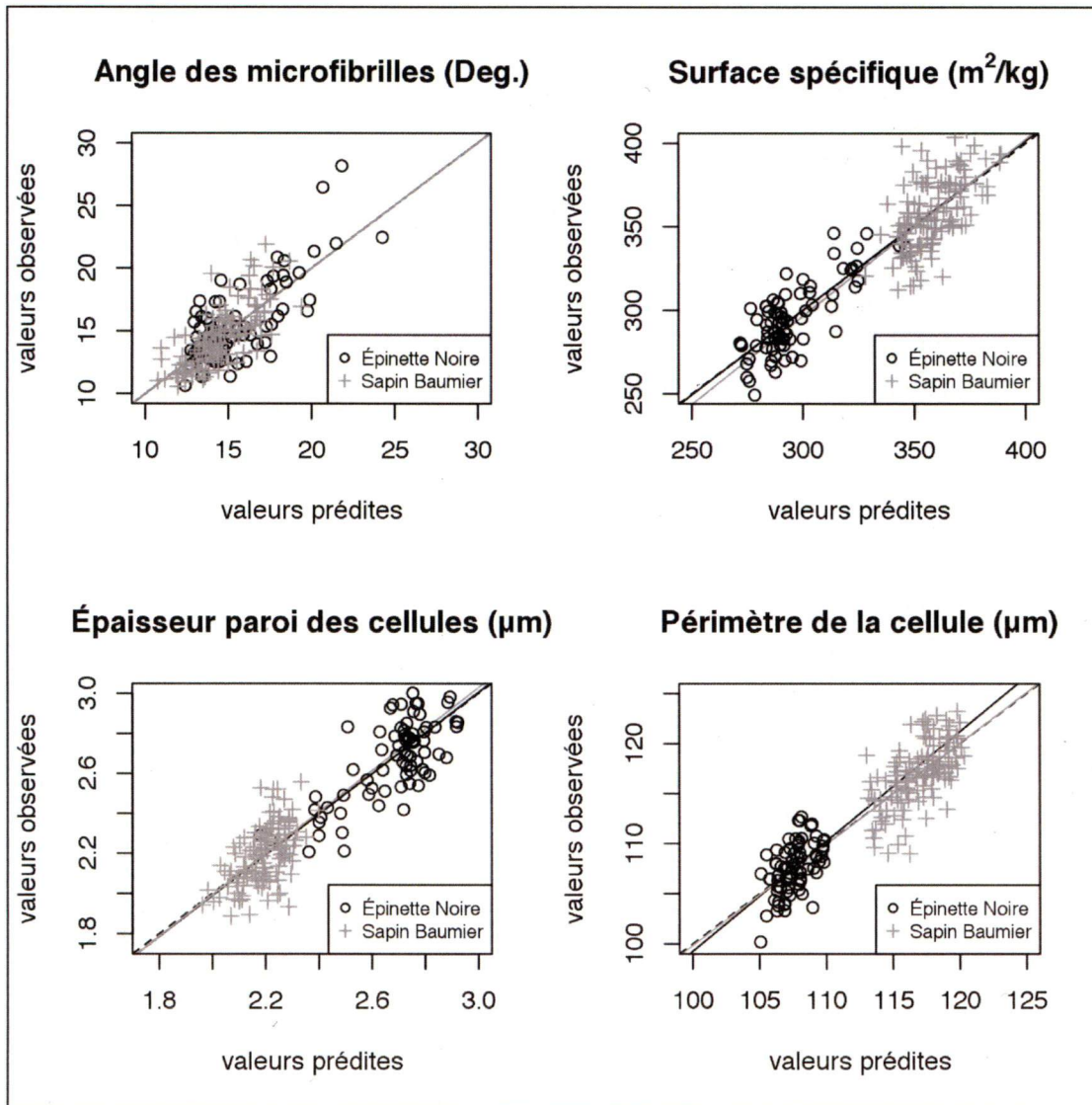


Figure 9 - Valeurs observées vs prédites pour les attributs de la fibre de bois (inférence multimodèle à l'échelle du paysage)

Comme les modèles sélectionnés sont similaires entre les données placette et cartographique, les variables d'importances identifiées sont également similaires (tableau 19). Les similarités sont aussi présentes lorsque les variables d'importances sélectionnées sont comparées entre l'épinette noire et le sapin baumier.

Tableau 19 - Importance des variables explicatives pour la prédiction de l'angle des microfibrilles (paysage)

	Estimation du modèle pondérée	Erreur standard Inconditionnelle	Intervalle de confiance inconditionnel (95 %)
Angle des microfibrilles - Épinette noire			
Composition en espèces	-0,041679	0,010720 (0,257)	-0,062690; -0,020667
Latitude	1,473591	0,489886 (0,332)	0,513432; 2,433750
Élévation	0,010239	0,003813 (0,372)	0,002766; 0,017712
Classe d'âge	-0,028859	0,013398 (0,464)	-0,05512; -0,002599
Angle des microfibrilles - Sapin baumier			
Élévation	0,012191	0,001449 (0,119)	0,009352; 0,015031
Classe de hauteur	-0,338127	0,066975 (0,198)	-0,469396; -0,206859
Température moyenne (SC)	-1,363539	0,359173 (0,263)	-2,067505; -0,659574
Densité de couronne	-0,037855	0,010929 (0,289)	-0,059275; -0,016435
Précipitations annuelles	-0,002952	0,001265 (0,429)	-0,005431; -0,000473
Épaisseur de la paroi des cellules - Épinette noire			
Classe d'âge	0,004317	0,00095 (0,220)	0,002454; 0,006179
Composition en espèces	0,002251	0,000703 (0,312)	0,000873; 0,00363
Éclaircie précommerciale	-0,204947	0,066973 (0,327)	-0,336213; -0,073682
Épaisseur de la paroi des cellules - Sapin baumier			
Classe d'âge	0,002000	0,000594 (0,297)	0,000836; 0,003165
Élévation	-0,000347	0,000110 (0,317)	-0,000563; -0,000131
Éclaircie précommerciale	-0,103879	0,039469 (0,380)	-0,181236; -0,026522
Surface spécifique - Épinette noire			
Classe d'âge	-0,417998	0,088776 (0,212)	-0,591995; -0,244001
Composition en espèces	-0,252578	0,067204 (0,266)	-0,384295; -0,120862
Éclaircie précommerciale	20,57379	6,393446 (0,311)	8,042870; 33,104720
Surface spécifique - Sapin baumier			
Élévation	0,065580	0,016048 (0,245)	0,034127; 0,097033
Classe d'âge	-0,300104	0,084360 (0,281)	-0,465447; -0,134761
Éclaircie précommerciale	16,533000	5,717890 (0,346)	5,326145; 27,73986
Température moyenne (SC)	-8,129815	3,979844 (0,490)	-15,93017; -0,329463
Périmètre de la cellule - Épinette noire			
Classe de hauteur	0,570707	0,138085 (0,242)	0,300066; 0,841348
Classe d'âge	-0,031696	0,013094 (0,413)	-0,05736; -0,006032
Composition en espèces	0,020684	0,009735 (0,471)	0,001604; 0,039764
Périmètre de la cellule - Sapin baumier			
Classe de hauteur	0,576805	0,103816 (0,180)	0,373329; 0,780281
Précipitations annuelles	0,008135	0,001896 (0,233)	0,004419; 0,011851

* Les variables explicatives sont en ordre décroissant de capacité prédictive.

** Les valeurs entre parenthèses représentent le ratio entre l'erreur standard et l'estimation du modèle pondérée

5 Discussion générale

Le présent projet a été mis au point à partir d'une demande bien précise de l'industrie forestière de Terre-Neuve. Il s'agissait d'utiliser les données de l'inventaire forestier et les données climatiques existantes afin de créer des modèles de prédiction pour les attributs de la fibre de bois. Les résultats obtenus corroborent bien les hypothèses de départ. En effet, il a été possible de prédire de manière assez efficace les attributs de la fibre de bois, en particulier pour les placettes d'épinette noire. Pour les résultats de la modélisation, un seuil minimal de 0,40 pour les valeurs des coefficients de détermination (R^2) avait été établi afin d'assurer une spatialisation assez représentative. C'est donc dire que la majorité des résultats de l'inférence multimodèle, soit 28 modèles sur un total de 36 répondent à ce critère. Ce sont plus de 75 % des modèles (issus de l'inférence multimodèle) qui ont donné des résultats supérieurs aux seuils attendus ($R^2 \geq 0,40$) et pour l'épinette noire, 11 modèles sur 16 ont donné des valeurs de R^2 supérieures à 0,55. Pour le sapin baumier, les résultats de la modélisation sont nettement inférieurs, avec 7 modèles sur 16 qui ont un R^2 supérieur à 0,45, alors que sept modèles sur un total de 16 n'ont pas satisfait au seuil minimal. La valeur des erreurs quadratique au carré est généralement semblable pour les deux essences, à l'exception des résultats pour l'angle des microfibrilles où les valeurs du RMSE pour le sapin baumier sont nettement inférieures.

Parmi les variables d'influences identifiées, l'âge est celle qui se retrouve identifiée le plus grand nombre de fois à travers tous les attributs de fibre (26/32; 81 %), toute espèce et tout type de données confondus. Ces résultats confirment ceux obtenus par d'autres chercheurs, qui se sont particulièrement attardés à la densité du bois (Colin *et al.*, 1992; DeBell *et al.*, 2004; Van Leeuwen *et al.*, 2011). La proportion de bois juvénile et de bois mature apparaît comme étant une explication probable de ces relations entre l'âge et les attributs de la fibre de bois (Van Leeuwen *et al.*, 2011). La seconde variable d'importance identifiée à travers les attributs de fibre et toute espèce et type de données est l'éclaircie précommerciale (21/32; 66 %). Encore une fois, la littérature offre des informations qui abondent dans le même sens, la qualité du bois est généralement améliorée suite à des opérations d'éclaircie pré-commerciale (Jaakkola *et al.*, 2005; Zobel, 1992). Il y a cependant une différence notable entre l'épinette noire et le sapin baumier en termes de variables d'influences. En effet, la composition en espèce est une variable d'importance identifiée pour tous les attributs de la fibre, chez l'épinette noire, tant pour les

données placette que pour la donnée cartographique du paysage. Il a été mentionné précédemment que le sapin baumier est une espèce particulièrement compétitive (Burns et Honkala, 1990), il semble donc que sa présence dans les placettes d'épinette noire affecte les propriétés du bois. La compétition pour la lumière peut par exemple entraîner une croissance plus rapide en hauteur, ou encore ralentir la croissance par manque de ressources, affectant ainsi les propriétés du bois. Dans le cas présent, la deuxième option semble la plus plausible, compte tenu qu'à l'échelle de la placette, la densité de même que l'épaisseur de la paroi des cellules de l'épinette noire est plus grande lorsque l'âge est plus grand, que le diamètre à hauteur de poitrine est moindre et que la composition en espèce est une variable présente. Par contre, la composition en espèces est une variable qui a seulement été identifiée à une occasion chez le sapin baumier, pour l'angle des microfibrilles. Le sapin baumier semble pour sa part être influencé par l'élévation, variable identifiée à 13 occasions (sur une possibilité de 16), une variable reconnue pour son influence sur la croissance des végétaux et sur les attributs de la fibre de bois (Swenson et Enquist, 2007; Vaganov *et al.*, 2006; Watt *et al.*, 2008a; Watt *et al.*, 2008 b). Les variables altitudes et élévations qui avaient été identifiées dans la littérature comme étant susceptible d'influencer les propriétés de la fibre de bois n'ont cependant pas montré de tendance nette dans les résultats obtenus.

En plus des quatre attributs de la fibre étudiés dans le chapitre 3 et identifiés comme étant les plus importants pour l'industrie, quatre autres attributs ont été traités dans le cadre de ce projet. Ces quatre attributs supplémentaires viennent compléter le portrait global de la fibre de bois et des facteurs susceptibles d'influencer leur développement. Les attributs laissent entrevoir des ressemblances dans les éléments d'influence, mais chacune d'elle représente une facette de la croissance de l'arbre et il importait donc de les étudier toutes. Dans l'ensemble, il est possible de relever certaines tendances entre les différents attributs de la fibre de bois (incluant ceux étudiés dans le chapitre 3), mais également entre les espèces et les types de données étudiées, que ce soit pour les modèles sélectionnés ou les variables d'importances. Tout d'abord, au niveau des modèles sélectionnés pour l'épinette noire, tant pour les données placette que pour les données cartographiques du paysage, deux modèles apparaissent (seul ou ensemble) dans l'ensemble des résultats d'attributs de la fibre, soit les modèles 16, 17 et 13. Pour le sapin baumier, ce sont les modèles 18, 14 et 17 qui apparaissent (seul ou ensemble) dans l'ensemble des attributs étudiés. Lorsque ce sont les variables d'importance qui sont examinées, les données de type végétation

sont celles qui sont le plus souvent identifiées au niveau de la placette pour les deux espèces. Les variables de type géographiques sont aussi importantes pour la prédiction des attributs du sapin baumier. Pour les données cartographiques du paysage, les tendances sont moins claires que pour les données placette. Toutefois, les variables de type végétation et de type géographique sont celles qui dominent les résultats pour l'ensemble des attributs de la fibre.

Alors que les analyses de régression sont omniprésentes dans la littérature lorsqu'il est question des attributs de la fibre de bois, l'approche utilisée par une analyse multimodèle est encore peu utilisée en foresterie. Dans les différentes sphères de la biologie, la méthode de sélection de modèles utilisant le critère d'Akaike gagne en utilisation. Comme la foresterie est elle aussi une discipline où les interactions sont complexes, l'approche par sélection de modèle, couplée à l'inférence multimodèle semblait adaptée à notre problématique, ce que les résultats ont confirmé. L'inférence multimodèle a permis d'obtenir des résultats probants, même si dans le cas de certains modèles cette étape n'était pas nécessaire, un seul modèle ayant été sélectionné. De plus, cette méthode de sélection de modèles a permis d'obtenir une information quantifiée de l'incertitude reliée à chacun des « meilleurs modèles » identifiés. La validation croisée a permis d'établir que les modèles issus de l'inférence multimodèle donnaient des valeurs de RMSE comparables à celles obtenues avec la validation croisée. Finalement, il a également été possible d'identifier certaines variables d'influence et le support statistique relatif de chacune d'elles.

Pour la province de Terre-Neuve et Labrador, aucune cartographie disponible ne permettait une évaluation des attributs de la fibre du bois de manière aussi précise sur l'ensemble du territoire, c'est-à-dire leur répartition provinciale et la possibilité d'identifier des zones clés pour l'exploitation forestière. Cela permettra de cibler et d'adapter la récolte selon les besoins (ex. mélange d'essence pour les recettes de pâtes et papier) et d'en diminuer les coûts. La possibilité de coupler les modèles aux bases de données de l'inventaire forestier pourra permettre une mise à jour constante à mesure que les placettes sont échantillonnées. Il sera également possible d'étudier et de comparer l'évolution des résultats de la modélisation dans le temps.

Certaines limitations ont été notées et certains aspects n'ont pu être explorés ou approfondis, principalement à cause de la faible taille statistique des échantillons. D'une part, un choix important a dû être fait, c'est-à-dire utiliser l'ensemble de la base de données pour des fins de

modélisation et devoir laisser tomber l'option de séparer le jeu de données en deux ensembles (calibration/validation). Au niveau des données, il faut également souligner que dans les bases de données de l'inventaire forestier, certaines variables n'étaient pas disponibles pour l'ensemble de la province et n'ont donc pas été retenues pour la modélisation, c'est entre autres le cas des données de dépôts de surface et l'indice de Damman, dont certains éléments auraient pu permettre de faire ressortir certains facteurs d'influence. Certaines variables qui décrivent des particularités de l'île de Terre-Neuve et de ces peuplements auraient aussi été très intéressantes à considérer, comme la distance des placettes par rapport à la côte, les données anémométriques ou encore l'humidité des sols, leur capacité de drainage ainsi que la structure diamétrale du peuplement, et auraient peut-être pu améliorer les résultats obtenus. Le fait que les variables prédictives représentent l'état du peuplement à un moment précis contrairement aux phénomènes de croissance qui s'échelonnent sur de grandes périodes de temps, fait partie des incertitudes liées aux résultats. Il en va de même pour les variations géographiques qui se produisent à une échelle très fine, les variables représentent l'état du peuplement de manière locale et régionale et les effets de microsite ne sont pas nécessairement bien représentés. L'incertitude reliée à la mesure des paramètres n'était pas documentée dans les bases de données, mais aurait pu fournir une information sur la précision des données. D'autre part, la notion d'autocorrélation spatiale n'a pu être traitée directement étant donné la taille de l'échantillon. Des variables de type géographiques ont cependant été utilisées, afin de représenter des variations locales ou régionales. D'un point de vue statistique, les modèles utilisés pour les analyses ont été limités à des relations linéaires alors que les interactions dans les phénomènes biologiques sont souvent très complexes. À ce chapitre, l'utilisation des modèles mixtes dans les modèles candidats permettrait peut-être d'améliorer les résultats. Étant donné que les arbres échantillonnés pour la fibre de bois étaient situés à l'extérieur des placettes d'échantillonnage permanentes, il est possible que les résultats présentent un léger biais. Enfin, malgré l'utilisation d'une méthode de validation statistique, il n'a toutefois pas été possible de vérifier les résultats de la modélisation spatiale directement sur le terrain, mais cette étape pourra toujours être réalisée dans un futur rapproché. Toutefois, il est important de mentionner qu'aucune des limites énumérées précédemment ne compromet de manière importante les résultats et conclusions des analyses réalisées. Dans le meilleur cas, elles auraient probablement permis d'améliorer les résultats obtenus.

Sachant qu'il est possible de prédire certains attributs de la fibre de bois de manière assez efficace en utilisant des données qui sont déjà disponibles, les applications concrètes pour le milieu forestier sont multiples. L'application d'une approche par sélection de modèles est possiblement applicable à d'autres environnements de forêt boréale et possiblement aux forêts de feuillus, en plus d'être bien adaptée pour nombre de domaines liés aux processus biologiques complexes. De plus, lorsque les échantillons ne sont pas de très grandes tailles, le critère d'Akaike peut être utilisé ainsi qu'une méthode de validation croisée afin de tirer un maximum d'information des données. La possibilité de déterminer les intervalles de confiance de chacun des modèles ajoute une dimension permettant d'évaluer l'efficacité des modèles. Au niveau de l'amélioration des connaissances, le fait d'inclure les résultats de la modélisation dans les systèmes d'informations géographiques ouvre la porte à un examen approfondi des patrons spatiaux pour les espèces prises séparément ou ensemble. De plus, la possibilité de cartographier les attributs de la fibre de bois est certes intéressante, mais de pouvoir représenter spatialement d'autre type d'information, tel que l'estimation des erreurs associées à la modélisation ou encore de cartographier les intervalles de confiance et ainsi permettre une compréhension encore plus entière des variables qui façonnent les propriétés spécifiques du bois.

L'une des avenues à explorer pour améliorer les résultats de cette approche serait d'utiliser des méthodes d'acquisition issues du domaine de la télédétection. Cela permettrait de compléter l'information disponible dans les bases de données actuelles et de réduire les déplacements coûteux sur le terrain en utilisant par exemple, l'imagerie satellitaire à très haute résolution spatiale ou le LiDAR aéroporté. Au niveau statistique, l'utilisation de modèles plus complexes comprenant des termes d'interactions, par exemple, serait une avenue possible. D'autres types d'approches statistiques mentionnées précédemment pourraient être explorées avec des échantillons de plus grandes tailles, c'est le cas des arbres de décisions, de la régression géographiquement pondérée ou encore la régression canonique.

Pour la réalisation de ce projet, ce sont les données de placettes qui étaient au cœur de l'analyse pour prédire les attributs de la fibre du bois à l'échelle du paysage (ensemble de la province). À cette échelle, ce sont les variables géographiques, climatiques et les caractéristiques du peuplement qui étaient les plus pertinentes pour la modélisation. Par contre, d'autres relations complexes existent à d'autres échelles. Par exemple, à l'échelle locale (groupe d'arbres), la

compétition est susceptible d'être l'un des facteurs influents des caractéristiques de la fibre de bois. À l'échelle de l'arbre, ce sont plutôt les étapes de croissance, la proportion de bois juvénile et de bois mature ainsi que la proportion de bois initial et de bois final qui risquent d'être les facteurs d'influence, de plus, la variabilité d'un arbre à l'autre pourrait aussi être prise en compte à cette échelle. Cependant, le fait d'étudier les attributs de la fibre de bois à plusieurs échelles (placette, peuplement, groupes d'arbres, arbre seul et même au niveau des cernes de croissance) et de combiner les résultats permettrait d'avoir un portrait à la fois global, mais aussi très précis de la ressource en bois et de sa répartition spatiale. Ce genre de modélisation peut être applicable à d'autres régions boréales et peut possiblement être adaptée à l'étude des feuillus.

6 Conclusion

Le but de ce projet était d'établir des modèles prédictifs pour les différents attributs de la fibre de bois, et ce, en utilisant des données existantes issues de l'inventaire forestier traditionnel pour l'île de Terre-Neuve. Tant pour l'épinette noire (*Picea mariana*) que pour le sapin baumier (*Abies balsamea*), les résultats ont démontré qu'il était possible d'établir ce genre de modèle et de les appliquer à l'ensemble du territoire afin de générer une cartographie générale de la répartition spatiale des attributs de la fibre de bois.

La revue de la littérature a permis d'identifier des variables explicatives à considérer et a également fourni des pistes à explorer en termes de méthodes de modélisation statistiques. C'est à partir de ces informations que le choix d'une méthode par sélection de modèle, couplée à une méthode d'inférence multimodèle a été fait. Ce qui a permis d'obtenir de bonnes prédictions pour l'ensemble des attributs de fibre de bois à l'étude, avec des coefficients de détermination (R^2) moyens de 0,53 pour l'épinette noire et de 0,42 pour le sapin baumier. Ce qui porte à croire qu'en plus d'être efficace dans le cas présenté, cette méthode pourrait être utilisée dans d'autres contextes de modélisation et pourrait même être améliorée. Par exemple, l'intégration des modèles linéaires mixtes, souvent utilisés en foresterie, pourrait améliorer les résultats obtenus en permettant de mieux représenter la complexité des interactions des différentes variables présentes dans les modèles. L'utilisation d'une procédure de validation croisée a quant à elle permis de quantifier la qualité de la prédiction des modèles. L'exercice a également permis l'identification des variables d'influences pour chacun des attributs de la fibre, et ce, pour chaque espèce étudiée. Cet aspect est particulièrement important, car l'un des objectifs de base était de déterminer les facteurs les plus susceptibles d'influencer les caractéristiques de la fibre de bois. C'est donc dire que la modélisation des attributs de la fibre de bois a permis d'améliorer les connaissances en ce qui a trait aux facteurs d'influence, spécifiquement pour l'île de Terre-Neuve.

Ce projet de recherche ouvre la voie à une utilisation plus étendue de la modélisation basée sur la théorie de l'information, particulièrement dans le domaine de la foresterie. En plus de s'être révélée efficace dans le cas de la forêt boréale de Terre-Neuve, l'implémentation des résultats de la modélisation dans les bases de données permettra d'augmenter l'information disponible pour l'industrie forestière. Ce qui entraînera une meilleure connaissance de la répartition spatiale des différents attributs de la fibre de bois, permettant ainsi l'amélioration des opérations forestières et

la gestion de la ressource en bois. Comme il s'agit d'un domaine d'activité où la concurrence internationale est forte, l'amélioration des outils actuels et la réduction des coûts de production sont donc primordiales.

Références supplémentaires

** Les références mentionnées sont celles qui ne figurent pas dans le manuscrit (chapitre 3).*

Antonova, G. F. et Stasova, V. V. (1993) Effects of environmental factors on wood formation in Scots pine stems. *Trees*, vol. 7, p. 214-219.

Amiri, R., Bégin, B., Deshaies, S. et Mozaffari, S. (2004) Effects of wood and plup quality on linting propensity. *Pulp & Paper Canada*, vol. 105, n° 6, p. 23-29.

Brunsdon, C., Fotheringham, S. et Charlton, M. (1998) Geographically Weighted Regression. *Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician)*, vol. 47, n° 3, p. 431-443.

Burman, P. (1989) A comparative study of ordinary cross-validation, v-fold cross-validation and the repeated learning-testing methods. *Biometrika*, vol. 76, n° 3, p. 503-514.

Burns, R. M. et Honkala, B. H., (1990) *Silvics of North America: 1. Conifers; Agriculture Handbook 654*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington, DC. vol. 2 877 p.

Colin, F., Houllier, F., Leban, J.-M. et Nepveu, G. (1992) Modélisation de la croissance des arbres, des peuplements, et de la qualité des bois. *Technique et forêt*, p. 248-254.

De'ath, G. et Fabricius, K. E. (2000) Classification and Regression Trees: A Powerful Yet Simple Technique for Ecological Data Analysis. *America*, vol. 81, n° 11, p. 3178-3192.

Debell, D. S., Singleton, R., Gartner, B. L. et Marshall, D. D. (2004) Wood density of young-growth western hemlock: relation to ring age, radial growth, stand density and site quality. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 34, p. 2433-2442.

Downes, G. M. et Drew, D. M. (2008) Climate and growth influences on wood formation and utilisation. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, vol. 70, n° 2, p. 155-167.

Esbensen, K. (2004) *Multivariate analysis in practice*, 5th edition, An introduction to multivariate data analysis and experimental design. Camo, Oslo, 598 p.

Fournier, R. A., Luther, J. E., Guindon, L., Lambert, M., Piercey, D., Hall, R. J., & Wulder, M. A. (2003). Mapping aboveground tree biomass at the stand level from inventory information: test cases in Newfoundland and Quebec. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 33, p. 1846-1863.

FPIinnovations Paprican (2011) *SilviScan and the Wood Density Network*. In FPIinnovations Paprican, [http://wcm.paprican.ca/wcmpaprican/publishing.nsf/AttachmentsByTitle/EV_EvaluTree_SilviScan_Eng/\\$FILE/E_EvaluTree_SilviScan.pdf](http://wcm.paprican.ca/wcmpaprican/publishing.nsf/AttachmentsByTitle/EV_EvaluTree_SilviScan_Eng/$FILE/E_EvaluTree_SilviScan.pdf), page consultée le 27 mars 2013.

Franklin, J. (1995) Predictive vegetation mapping: geographic modelling of biospatial patterns in relation to environmental gradients. *Progress in Physical Geography*, vol. 19, n° 4: p. 474-499.

Fritts H.C. (1976) Tree rings and climate. Academic Press, London

Gouvernement de Terre-Neuve-et-Labrador (2012) Hydrology and climate of Newfoundland. In Department of environment and conservation, <http://www.env.gov.nl.ca/env/waterres/cycle/hydrologic/nl.html>, page consultée le 27 mars 2013.

Hoeting, J. A., Davis R. A. Merton A. A. et Thompson S. E. (2006) Model selection for Geostatistical Models Ecological Applications, vol. 16, n° 1, p. 87-98.

Jaakkola, T., Mäkinen, H. et Saranpää, P. (2005). Wood density in Norway spruce: changes with thinning intensity and tree age. Canadian Geographer, vol. 35, p. 1767-1778.

Jang, H.F. et Seth, R.S. (1998) Characterization of the collapse behaviour of papermaking fibres using confocal microscopy. Conference proceeding. 84th annual meeting, Canadian Pulp and Paper Association, Montreal 27-30 Jan. p. B205-B212.

Jozsa, L. A. et Middleton, G. R. (1994) A discussion of wood quality attributes and their practical implications, Special publication n° SP-34, 1-42.

Kupfer, J. A. et Farris, C. A. (2006) Incorporating spatial non-stationarity of regression coefficients into predictive vegetation models. Landscape Ecology, vol. 22, n° 6, p. 837-852.

Labrecque, S., Fournier, R. A., Luther, J. E. et Piercey, D. (2006) A comparison of four methods to map biomass from Landsat-TM and inventory data in western Newfoundland. Forest Ecology and Management, vol. 226 n° 1-3, p. 129-144.

Lenz, P., Bernier-Cardou, M., MacKay, J. et Beaulieu, J. (2012) Can wood properties be predicted from the morphological traits of a tree? A canonical correlation study of plantation-grown white spruce. Canadian Journal of Forest Research, vol. 42, p. 1518-1529.

Luther, J. E., Fournier, R. A., Piercey, D. E., Guindon, L. et Hall, R. J. (2006) Biomass mapping using forest type and structure derived from Landsat TM imagery. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 8, n° 3, p. 173-187.

McKenney, D.W. et Pedlar, J.H. (2003) Spatial models of site index based on climate and soil properties for two boreal tree species in Ontario, Canada. Forest Ecology and Management, vol. 175, n° 1-3, p. 497-507.

McKenney, D.W., Hutchinson, M.F., Papadopol, P., Lawrence, K., Pedlar, J.H., Campbell, K., Milewska, E., Hopkinson, R.F., Price, D. et Owen, T. (2011) Customized spatial climate models for North America. Bulletin of American Meteorological Society, vol. 92, n° 12, p. 1611-1622.

Meades, W. et Moores, L. (1989) Forest site classification manual : a field guide to the Damman Forest Types of Newfoundland. Canadian Forest Service, Newfoundland and Labrador Region, St John's, Newfoundland, 285 p.

Miller, J., Franklin, J. et Aspinall, R. (2007) Incorporating spatial dependence in predictive vegetation models. Ecological Modelling, vol. 202, n° 3-4, p. 225-242.

Morgan, G.A., Leech, N.L., Gloeckner, G.W. & Barrett, K.C. (2004) SPSS For Introductory Statistics Use And Interpretation, 2nd edition. Lawrence Erlbaum Associates, Inc., États-Unis, 211 p.

Ngo, L. et Rand, R. (2002) Model Selection in Linear Mixed Effects Models Using SAS® Proc Mixed. SUGI 22, <http://www2.sas.com/proceedings/sugi22/STATS/PAPER284.PDF>, page consultée le 11 octobre 2013.

Roberts, B. A., Woodrow, E. F., Bajzak, D. et Osmond, S. M. (1996) A cooperative, integrated project to classify forest sites in Newfoundland. Environmental Monitoring and Assessment, vol. 39, p. 353-364.

Stokes, K. E. et Cunningham, S. A. (2006) Predictors of recruitment for willows invading riparian environments in south-east Australia: implications for weed management. Journal of Applied Ecology, vol. 43, n° 5, p. 909-921.

Tabachnick, B.G. et Fidell, L.S. (1996) Using Multivariate Statistics, 5th edition. Pearson Education inc., États-Unis, 980 p.

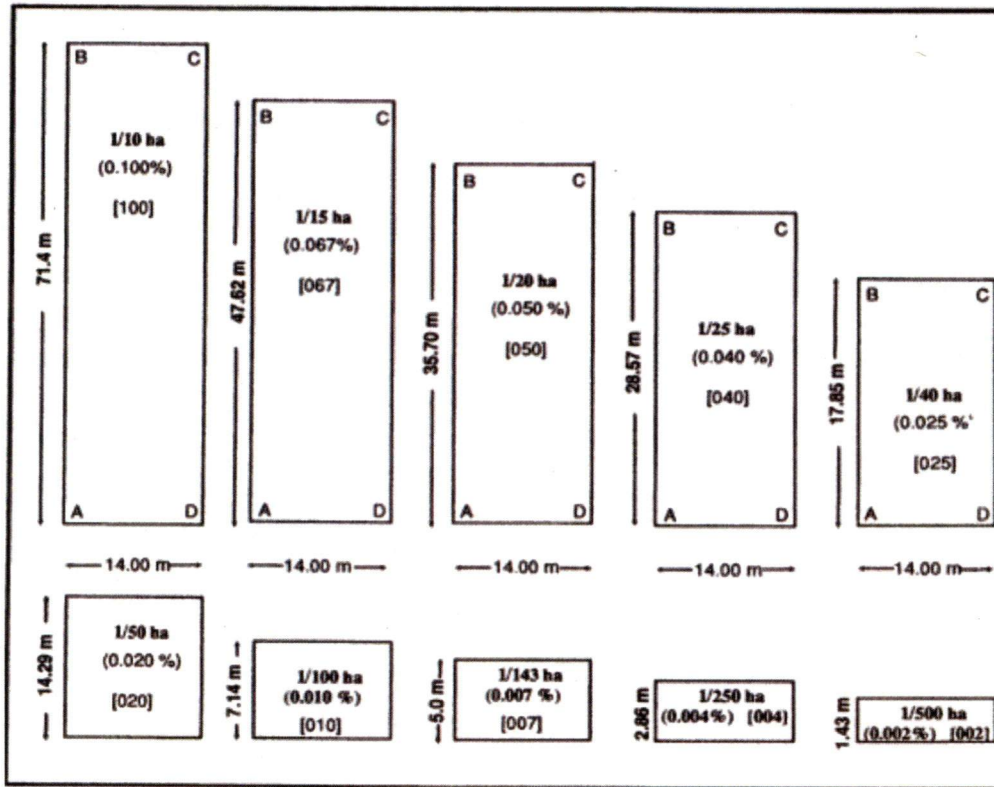
Vaganov, E.A., Hughes, M.K. et Shashkin, A.V. (2006) Growth Dynamics of Conifer Tree Rings Images of Past and Future Environments. Springer, Allemagne, 354 p.

Watson, P., Garner, C., Robertson, R., Reath, S., Gee, W. et Hunt, K. (2003) The effects of initial tree spacing on the fibre properties of plantation-grown coastal western hemlock. Canadian Journal of Forest Research, vol. 33, p. 2460-2468.

Zobel, B. (1992) Silvicultural effects on wood properties. IPEF International, vol. 2, p. 31-38.

Annexes

Annexe 1 – Taille des placettes d'échantillonnage permanente



LEGEND: 1/xx ha = represents area fraction in hectares
 (0.xxx) = represents area percent
 [xxx] = code used to represent each plot size

Toutes les placettes sont de forme rectangulaire. Leur taille varie pour les peuplements immatures ou semi-matures et est fixé à 1/25 ha pour les peuplements matures et surannés. La taille de la placette dépend de la densité. Un peuplement très dense va requérir une placette relativement petite alors qu'un peuplement plus ouvert va requérir une placette plus grande. Règle générale, une placette doit avoir un minimum de 75 arbres qui rencontrent le critère minimal d'identification pour le type de placette donnée.

(Newfoundland Forest Service, non publié).

Annexe 2 – Liste des variables d’inventaire forestier

Type de placette - <i>Plot Type</i>	Densité de couronne - <i>Crown Density</i>
District	Site
Numéro de la placette - <i>Plot Number</i>	Classe de hauteur - <i>Height class</i>
Année de la dernière remesure - <i>Last Re-Measurement</i>	Classe d'âge - <i>Age class</i>
Nombre de remesures - <i>Re-Measurement</i>	Dernier traitement de silviculture - <i>Last Silviculture</i>
Altitude - <i>Elevation</i>	Année de la dernière silviculture - <i>Year of Last Silviculture</i>
Latitude	Indice de site de Damman - <i>Damman Site Type</i>
Longitude	Éco Région - <i>EcoRegion</i>
Aspect	Géomorphologie - <i>Geomorphology</i>
Pente - <i>Slope</i>	Roche-mère - <i>Mapped Bedrock</i>
Strate - <i>Stratum</i>	Dépôts de surface - <i>Mapped Surficial</i>
Type de peuplement - <i>Actual Stand Type</i>	Classes CLI - <i>CLI Class</i>
(i) Composition en espèces - <i>Species Composition</i>	Origine du peuplement - <i>Stand Origin</i>
(ii) Classe d'âge - <i>Age Class</i>	Année d'origine - <i>Year of Origin</i>
(iii) Classe de hauteur - <i>Height Class</i>	Dernière perturbation - <i>Last Disturbance</i>
(iv) Densité de couronne - <i>Crown Density</i>	Année de la dernière perturbation - <i>Year of Last Disturbance</i>
v) Sites	Superficie de la placette - <i>PlotArea</i>
Groupe de travail - <i>Working group</i>	

Annexe 3 – Liste des variables climatiques

Variables ANUCLIM	Autres variables bioclimatiques
01 Température moyenne annuelle	01 Numéro du jour julien du début de la saison de croissance
02 Amplitude quotidienne moyenne [moyenne (max – min de la période)]	02 Numéro du jour julien de la fin de la saison de croissance
03 Isothermalité (paramètre 2/paramètre 7)	03 Durée en jours de la saison de croissance (DJC)
04 Saisonnalité de la température (c.v.)	04 Précipitations totales pour la période 1
05 Température maximale de la période la plus chaude	05 Précipitations totales pour la période 2
06 Température minimale de la période la plus froide	06 Précipitations totales pour la période 3
07 Amplitude annuelle de la température (paramètre 5 - paramètre 6)	07 Précipitations totales pour la période 4
08 Température moyenne du trimestre le plus humide	08 DJC au-dessus de la température de référence pour la période 1
09 Température moyenne du trimestre le plus sec	09 DJC au-dessus de la température de référence pour la période 2
10 Température moyenne du trimestre le plus chaud	10 DJC au-dessus de la température de référence pour la période 3
11 Température moyenne du trimestre le plus froid	11 DJC au-dessus de la température de référence pour la période 4
12 Précipitations annuelles	12 Température moyenne annuelle
13 Précipitations de la période la plus humide	13 Température minimale annuelle
14 Précipitations de la période la plus sèche	14 Température maximale annuelle
15 Saisonnalité des précipitations (c.v.)	15 Température moyenne de la période 3
16 Précipitations du trimestre le plus humide	16 Amplitude de la température pour la période 3
17 Précipitations du trimestre le plus sec	
18 Précipitations du trimestre le plus chaud	
19 Précipitations du trimestre le plus froid	

Remarque : La saison de croissance varie d'une espèce végétale à l'autre. Elle a été ici déterminée selon des critères de température : nous avons considéré qu'elle commençait quand la température moyenne quotidienne était supérieure ou égale à 5 °C sur cinq jours consécutifs après le 1er mars, et qu'elle se terminait quand le minimum moyen était inférieur à -2 °C après le 1^{er} août. Comme ils correspondent plutôt à la période sans gel, ces critères de définition de la saison de croissance visent davantage les arbres que les cultures agricoles. D'autres critères peuvent être appliqués et seront fournis sur demande.

Période 1 – les trois mois précédant le début de la saison de croissance;

Période 2 – les six premières semaines de la saison de croissance;

Période 3 – la saison de croissance entière;

Période 4 – la différence entre la période 3 et la période 2.

(McKenney *et al.*, 2007)

Annexe 4 – Corrélations de Pearson

A) Variables environnementales pour l'épinette noire et le sapin baumier

Épinette Noire - N=77 (coin supérieur droit)												Sapin Baumlér - N=117 (coin inférieur gauche)													
	Élévation (m)	Latitude (deg.)	Pente (%)	Précipitations annuelles (mm)	Température moyenne du trimestre le plus chaud (°C)	Précipitations du trimestre le plus chaud (mm)	Température moyenne de la saison de croissance (°C)	Précipitations totales de la saison de croissance (mm)	Nombre de jours de la saison de croissance	Surface terrière du sapin baumlér (%)	Surface terrière de l'épinette noire (%)	DHP moyen (mm)	Hauteur dominante (m)	Hauteur moyenne (m)	Densité du peuplement	Surface terrière (m²/ha)	Volume total (m³)	Volume marchand brut (m³/ha)	Classes de hauteur (m)	Classes d'âge (ans)	Classes de densité de couronne (%)	Composition du peuplement / sapin baumlér (%)	Composition du peuplement / épinette noire (%)	Éclaircie précommerciale	Insectes
Élévation (m)		-0,188	0,004	,299(**)	-,274(*)	,341(**)	-,0172	0,136	-,274(*)	,351(**)	-,322(**)	-,08	-,093	-,148	-,065	-,121	-,162	-,16	0,077	,268(*)	-,215	,306(**)	-,291(*)	-,242(*)	,225(*)
Latitude (deg.)	-,230(*)		0,014	-,609(**)	-,531(**)	-,349(**)	-,452(**)	-,781(**)	-,644(**)	0,22	-,186	0,037	-,152	-,103	-,05	-,002	-,075	-,048	-,244(*)	-,173	0,104	,252(*)	-,243(*)	,261(*)	-,0107
Pente (%)	0,145	-,015		0,016	-,244(*)	0,11	-,098	-,035	-,108	0,115	-,228(*)	-,018	0,119	-,001	-,011	-,015	0,011	0,003	0,014	-,125	-,159	0,201	-,256(*)	-,0114	0,023
Précipitations annuelles (mm)	,317(**)	-,720(**)	0,055		-,05	,886(**)	0,017	,791(**)	,251(*)	0,18	-,196	-,154	0,06	-,114	0,103	-,046	-,063	-,093	0,146	0,171	-,082	0,193	-,019	-,282(*)	0,14
Température moyenne du trimestre le plus chaud (°C)	-,107	-,744(**)	0,018	,328(**)		-,380(**)	,807(**)	,277(*)	,678(**)	-,557(**)	,535(**)	0,217	,239(*)	,350(**)	-,032	0,129	,230(*)	,248(*)	,293(**)	0,132	-,007	-,524(**)	,517(**)	-,0124	-,03
Précipitations du trimestre le plus chaud (mm)	,262(**)	-,392(**)	0	,887(**)	-,003		-,269(*)	,575(**)	-,07	,385(**)	-,401(**)	-,221	-,025	-,234(*)	0,074	-,134	-,182	-,216	0,019	0,088	-,088	,398(**)	-,394(**)	-,0207	0,143
Température moyenne de la saison de croissance (°C)	0,042	-,661(**)	0,002	,275(**)	,915(**)	-,043		0,222	,649(**)	-,402(**)	,392(**)	0,188	0,222	,283(*)	-,092	0,04	0,118	0,143	,311(**)	0,147	0,018	-,334(**)	,334(**)	-,0128	-,011
Précipitations totales de la saison de croissance (mm)	0,07	-,823(**)	0,064	,885(**)	,589(**)	,732(**)	,433(**)		,582(**)	-,003	-,031	-,095	0,031	-,02	0,075	-,019	0,016	-,014	0,172	0,142	-,054	0,002	-,009	-,276(*)	0,093
Nombre de jours de la saison de croissance	-,288(**)	-,783(**)	0,114	,459(**)	,862(**)	,190(*)	,748(**)	,732(**)		-,286(*)	,237(*)	0,101	0,097	0,151	-,009	0,072	0,169	0,16	0,092	-,024	-,004	-,276(*)	,260(*)	-,0102	0,038
Surface terrière du sapin baumlér (%)	0,001	0,044	-,089	0,108	0,026	,183(*)	0,042	0,089	-,011		-,971(**)	0,058	-,085	-,171	-,173	-,122	-,168	-,175	-,015	-,096	-,132	,921(**)	-,932(**)	0,121	0,12
Surface terrière de l'épinette noire (%)	-,012	-,086	0,031	-,190(*)	0,04	-,305(**)	0,046	-,149	0,009	-,776(**)		-,083	0,021	0,128	0,202	0,129	0,157	0,165	0,127	0,113	0,158	-,915(**)	,934(**)	-,0129	-,085
DHP moyen (mm)	,437(**)	-,009	0,142	0,156	-,220(*)	,204(*)	-,209(*)	0,046	-,217(*)	-,013	-,215(*)		,657(**)	,852(**)	-,369(**)	,381(**)	,520(**)	,563(**)	,575(**)	0,169	-,134	0,053	-,043	-,035	-,023
Hauteur dominante (m)	,247(**)	0,011	0,129	0,056	-,06	0,064	-,058	-,007	-,081	0,168	-,319(**)	,670(**)		,857(**)	0,127	,628(**)	,725(**)	,736(**)	,791(**)	0,183	0,08	-,01	0,075	-,0219	-,016
Hauteur moyenne (m)	,223(*)	-,005	0,105	0,146	-,016	,189(*)	-,046	0,11	-,047	,214(*)	-,323(**)	,680(**)	,825(**)		-,103	,528(**)	,672(**)	,699(**)	,771(**)	0,177	0,041	-,017	0,163	-,0148	-,019
Densité du peuplement	-,329(**)	0,124	-,183(*)	-,204(*)	0,122	-,195(*)	0,123	-,132	0,079	,230(*)	-,065	-,708(**)	-,255(**)	-,268(**)		,698(**)	,548(**)	,498(**)	0,035	-,270(*)	,559(**)	-,0168	0,141	-,236(*)	0,095
Surface terrière (m²/ha)	-,05	0,108	-,197(*)	-,072	0,022	-,056	0,039	-,081	-,048	,292(**)	-,293(**)	-,007	,356(**)	,304(**)	,640(**)		,868(**)	,955(**)	,490(**)	-,145	,432(**)	-,0113	0,091	-,238(*)	0,098
Volume total (m³)	0,083	-,097	-,114	0,127	0,176	0,087	0,17	0,129	0,099	,260(**)	-,301(**)	,211(*)	,573(**)	,569(**)	,414(**)	,921(**)		,998(**)	,580(**)	-,117	,353(**)	-,0167	0,139	-,233(*)	0,091
Volume marchand brut (m³/ha)	0,13	-,092	-,122	0,141	0,162	0,107	0,164	0,129	0,072	,261(**)	-,312(**)	,282(**)	,610(**)	,607(**)	,340(**)	,898(**)	,995(**)		,600(**)	-,097	,331(**)	-,0167	0,141	-,226(*)	0,093
Classes de hauteur (m)	,369(**)	0,027	0,101	0,059	-,143	0,08	-,0122	-,049	-,175	0,084	-,197(*)	,718(**)	,800(**)	,748(**)	-,360(**)	,206(*)	,398(**)	,443(**)		,432(**)	-,037	-,0105	0,118	-,329(**)	0,024
Classes d'âge (ans)	,333(**)	0,113	,201(*)	-,094	-,325(**)	-,043	-,275(**)	-,194(*)	-,297(**)	-,191(*)	0,128	,549(**)	,366(**)	,288(**)	-,520(**)	-,276(**)	-,175	-,0137	,550(**)		-,293(**)	-,0131	0,164	-,484(**)	-,02
Classes de densité de couronne (%)	-,301(**)	0,097	-,190(*)	-,0159	0,176	-,0108	0,151	-,056	0,12	,240(**)	-,069	-,487(**)	-,0102	-,061	,536(**)	,303(**)	,223(*)	,184(*)	-,274(**)	-,476(**)		-,0134	0,122	-,023	0,008
Composition du peuplement / sapin baumlér (%)	0,074	0,13	-,025	0,114	-,011	,243(**)	-,07	0,035	-,0134	,668(**)	-,732(**)	,210(*)	,222(*)	,277(**)	0,01	,200(*)	,196(*)	,216(*)	,188(*)	-,02	0,015		-,987(**)	0,141	0,158
Composition du peuplement / épinette noire (%)	-,09	-,0104	-,025	-,012	0,085	-,235(*)	0,061	-,049	0,11	-,618(**)	,800(**)	-,248(**)	-,269(**)	-,266(**)	0,005	-,210(*)	-,210(*)	-,230(*)	-,201(*)	0,048	0,044	-,938(**)		-,013	-,0149
Éclaircie précommerciale	-,105	0,034	-,0142	-,02	0,047	-,05	0,068	-,016	-,01	0,015	-,013	-,018	-,293(**)	-,0181	-,01	-,0105	-,0164	-,0151	-,307(**)	-,392(**)	-,0088	0,07	-,066		-,09
Insectes	0,151	-,01	0,046	-,002	0,035	-,015	0,081	-,037	-,03	0,036	-,023	-,027	-,043	-,056	-,0102	-,067	-,043	-,028	0,015	0,105	0,033	0,055	-,066	-,0144	
**Corrélation significative à 0.01 (bilatéral)		R > 0,70 (corrélations positives et négatives)																							
*Corrélation significative à 0.05 (bilatéral)		R > 0,50 et < 0,70 (corrélations positives et négatives)																							

**Corrélation significative à 0.01 (bilatéral)

|R| > 0,70 (corrélations positives et négatives)

*Corrélation significative à 0.05 (bilatéral)

|R| > 0,50 et < 0,70 (corrélations positives et négatives)

B) Attributs de la fibre de bois pour l'épinette noire et le sapin baumier

Épinette Noire - N=77 (coin supérieur droit)	Longueur des fibres	Densité	Diamètre radial	Diamètre tangentiel	Masse linéique	Angle des microfibrilles	Module d'élasticité	Épaisseur de la paroi des cellules	Surface spécifique	Périmètre de la cellule
Sapin Baumier - N=117 (coin inférieur gauche)										
Longueur des fibres		.578(**)	.012	.633(**)	.756(**)	-.706(**)	.719(**)	.690(**)	-.723(**)	.339(**)
Densité	.312(**)		-.513(**)	.162	.816(**)	-.525(**)	.750(**)	.961(**)	-.948(**)	-.251(*)
Diamètre radial	.173	-.647(**)		.433(**)	.015	.078	-.198	-.283(*)	.270(*)	.882(**)
Diamètre tangentiel	.496(**)	-.241(**)	.629(**)		.646(**)	-.482(**)	.433(**)	.400(**)	-.431(**)	.807(**)
Masse linéique	.645(**)	.696(**)	.037	.463(**)		-.625(**)	.782(**)	.944(**)	-.947(**)	.348(**)
Angle des microfibrilles	-.462(**)	-.076	-.239(**)	-.277(**)	-.347(**)		-.932(**)	-.598(**)	.645(**)	-.201
Module d'élasticité	.549(**)	.586(**)	-.169	.141	.650(**)	-.776(**)		.802(**)	-.830(**)	.097
Épaisseur de la paroi des cellules	.492(**)	.942(**)	-.384(**)	.068	.895(**)	-.207(*)	.665(**)		-.993(**)	.024
Surface spécifique	-.512(**)	-.923(**)	.357(**)	-.086	-.900(**)	.267(**)	-.684(**)	-.987(**)		-.049
Périmètre de la cellule	.337(**)	-.531(**)	.936(**)	.862(**)	.233(*)	-.281(**)	-.047	-.220(*)	.194(*)	
**Corrélation significative à 0.01 (bilatéral)		R > 0,70 (corrélations positives et négatives)								
*Corrélation significative à 0.05 (bilatéral)		R > 0,50 et < 0,70 (corrélations positives et négatives)								

Annexe 5 – Coefficients des modèles sélectionnés

A) Échelle de la placette

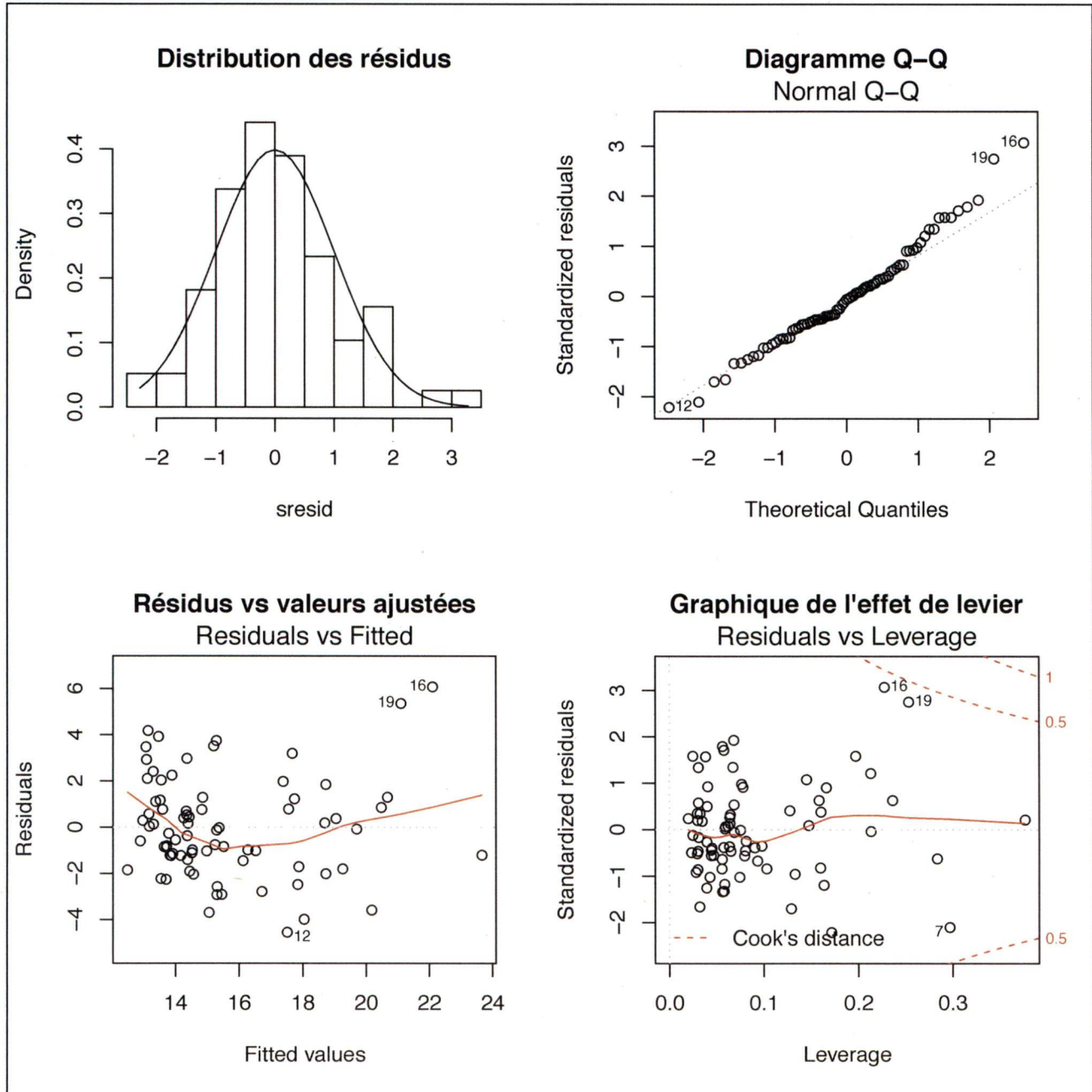
Épinette Noire	β_0 (constante)	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6
Densité							
mod16	577,53	1,99	-0,07	0,32	-5,68	0,92	-26,54
mod18	577,49	-0,07	6,78	-0,08	1,00	-6,67	-31,44
mod13	487,88	0,44	-0,66	-4,38	1,01	NA	NA
Masse linéique							
mod16	299,44	4,84	-0,03	0,43	-1,08	0,49	-30,68
mod17	235,01	-0,02	1,32	0,49	0,48	0,26	-29,09
Longueur des fibres							
mod13	1,47	0,00	0,04	-0,01	0,00	NA	NA
mod17	1,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	-0,11
Module d'élasticité							
mod17	38,40	0,00	-0,62	0,04	0,03	0,06	-1,94
mod16	-1,93	1,01	0,00	0,04	-0,08	0,03	-1,98
mod13	5,65	0,05	0,32	-0,27	0,04	NA	NA
Angle des microfibrilles							
mod17	-54,50	0,01	1,62	-0,05	-0,04	-0,23	1,46
Épaisseur de la paroi des cellules							
mod16	2,47	0,03	0,00	0,00	-0,02	0,00	-0,19
mod17	1,35	0,00	0,02	0,00	0,00	-0,01	-0,20
mod13	2,15	0,00	0,01	-0,02	0,01	NA	NA
Surface spécifique							
mod16	310,01	-1,58	0,03	-0,29	1,95	-0,45	19,37
mod17	451,67	0,03	-2,24	-0,33	-0,44	1,05	19,76
Périmètre de la cellule							
mod6	101,08	0,49	NA	NA	NA	NA	NA
mod17	119,26	0,00	-0,39	0,03	-0,02	0,50	-1,13
mod13	99,10	0,03	0,45	0,09	-0,01	NA	NA
mod14	89,45	0,00	0,52	0,00	0,03	0,39	0,13
mod16	91,06	0,59	0,00	0,03	0,43	-0,02	-1,78
mod7	102,75	0,34	NA	NA	NA	NA	NA
Sapin Baumier	b0 (constante)	b1	b2	b3	b4	b5	b6
Densité							
mod18	476,69	-0,03	4,60	-0,04	0,54	-5,43	-9,29
mod16	486,11	3,94	-0,05	0,10	-5,86	0,53	-8,65
mod12	484,37	-6,73	0,62	NA	NA	NA	NA
Masse linéique							
mod18	231,34	-0,05	10,67	0,01	0,38	-1,46	-14,81
mod17	609,02	-0,06	-5,65	0,13	0,29	-0,02	-16,64
mod13	329,59	0,06	3,40	-4,33	0,42	NA	NA
Longueur des fibres							
mod17	4,02	0,00	-0,05	0,00	0,00	0,02	-0,09
Module d'élasticité							
mod14	2,43	0,00	0,83	0,00	0,01	0,32	-0,23
Angle des microfibrilles							
mod14	35,13	0,01	-1,33	0,00	-0,02	-0,43	0,09
mod17	-18,26	0,01	0,75	-0,03	0,01	-0,36	0,14
Épaisseur de la paroi des cellules							
mod18	1,97	0,00	0,05	0,00	0,00	-0,02	-0,07
mod16	2,04	0,05	0,00	0,00	-0,02	0,00	-0,07
mod12	2,41	-0,03	0,00	NA	NA	NA	NA
Surface spécifique							
mod18	387,14	0,05	-6,06	0,01	-0,42	2,87	11,96
Périmètre de la cellule							
mod14	86,71	0,00	0,98	0,01	0,00	0,57	0,17

B) Échelle du paysage

Épinette Noire	β_0 (constante)	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6
Densité							
mod17	254,33	-0,05	4,72	0,32	0,96	-4,07	-30,40
mod13	450,94	0,35	-3,71	0,11	1,08	NA	NA
mod16	537,73	-2,17	-0,05	0,30	-0,05	0,80	-28,23
Masse linéique							
mod16	287,40	6,27	-0,03	0,34	-0,12	0,41	-33,13
mod17	196,44	-0,02	2,29	0,37	0,44	0,78	-30,53
Longueur des fibres							
mod17	1,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	-0,12
mod13	1,47	0,00	0,02	0,00	0,00	NA	NA
Module d'élasticité							
mod17	35,31	-0,01	-0,54	0,03	0,03	0,10	-2,06
mod16	-3,66	1,13	0,00	0,03	0,00	0,03	-2,08
Angle des microfibrilles							
mod17	-49,37	0,01	1,47	-0,04	-0,03	-0,27	1,66
Épaisseur de la paroi des cellules							
mod16	2,30	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,21
mod17	1,18	0,00	0,02	0,00	0,00	-0,01	-0,20
Surface spécifique							
mod17	474,36	0,03	-2,71	-0,26	-0,44	0,84	20,59
mod16	328,62	-1,13	0,03	-0,24	0,03	-0,39	20,53
Périmètre de la cellule							
mod13	102,75	0,02	0,60	-0,01	-0,03	NA	NA
mod17	114,81	0,00	-0,24	0,02	-0,04	0,56	-1,28
mod6	102,27	0,50	NA	NA	NA	NA	NA
Sapin Baumier	b0 (constante)	b1	b2	b3	b4	b5	b6
Densité							
mod17	413,55	-0,06	1,00	-0,03	0,39	-4,17	-22,81
mod18	377,78	-0,06	8,88	-0,05	0,29	0,24	-16,86
mod15	449,95	-0,05	6,69	-0,07	-25,90	NA	NA
mod13	403,65	-0,08	-4,40	0,59	0,59	NA	NA
Masse linéique							
mod18	196,08	-0,05	11,58	0,01	0,35	0,16	-15,46
mod17	613,21	-0,06	-5,66	0,07	0,26	0,25	-17,07
Longueur des fibres							
mod17	4,20	0,00	-0,05	0,00	0,00	0,02	-0,10
Module d'élasticité							
mod18	-1,65	0,00	1,14	0,00	0,01	0,03	-0,98
Angle des microfibrilles							
mod14	36,05	0,01	-1,36	0,00	0,00	-0,34	-0,04
Épaisseur de la paroi des cellules							
mod18	1,55	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	-0,10
mod17	3,03	0,00	-0,02	0,00	0,00	-0,01	-0,12
Surface spécifique							
mod18	444,22	0,06	-8,19	0,01	-0,30	-0,18	15,20
mod17	210,50	0,07	2,78	-0,03	-0,30	1,63	18,52
Périmètre de la cellule							
mod14	90,34	0,00	0,97	0,01	0,01	0,57	0,00
mod17	164,26	0,00	-1,12	0,02	-0,01	0,64	0,40

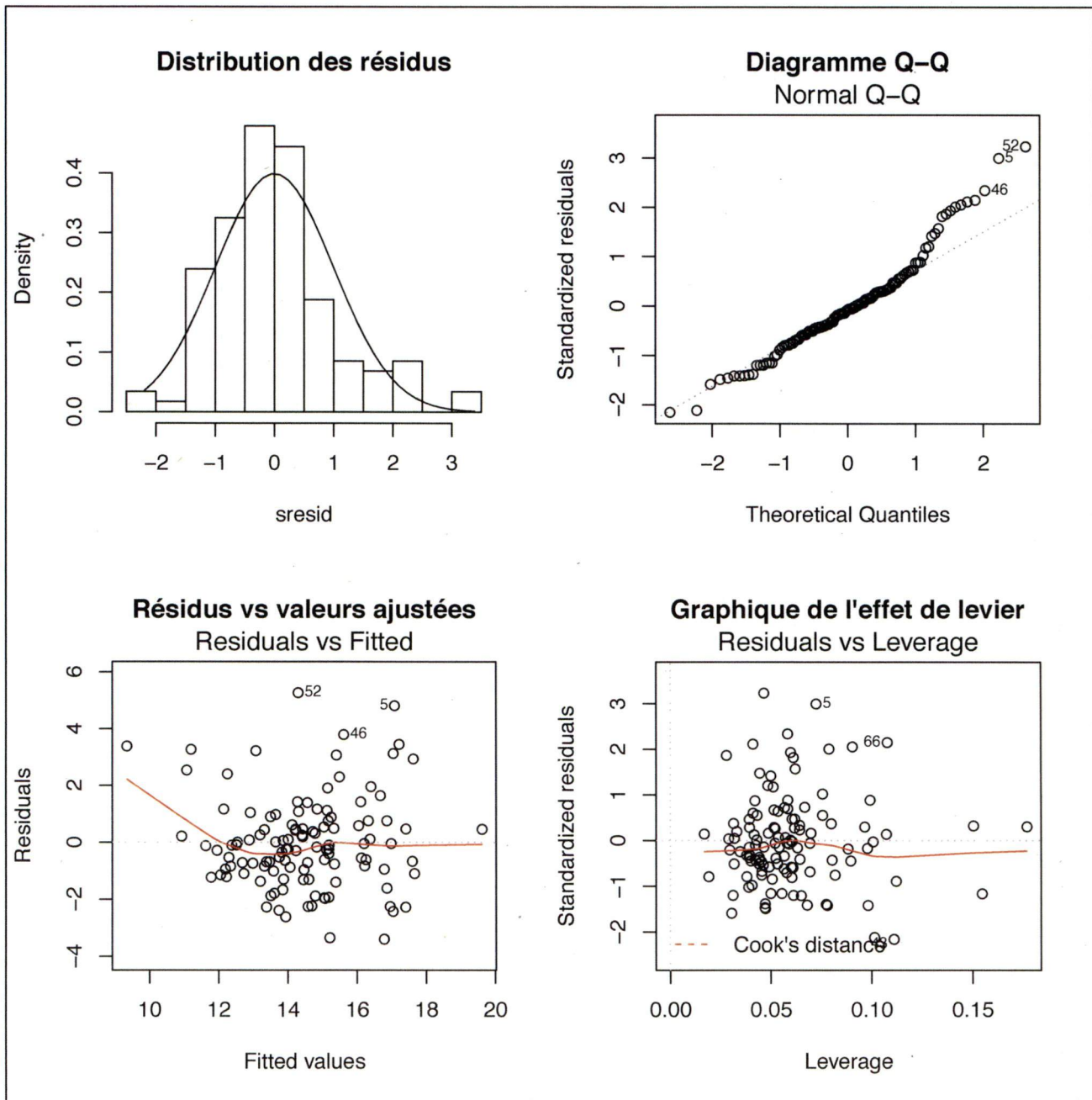
Annexe 6 – Graphiques diagnostiques

Modèle 17 – Angle des microfibrilles (épinette noire, placette)



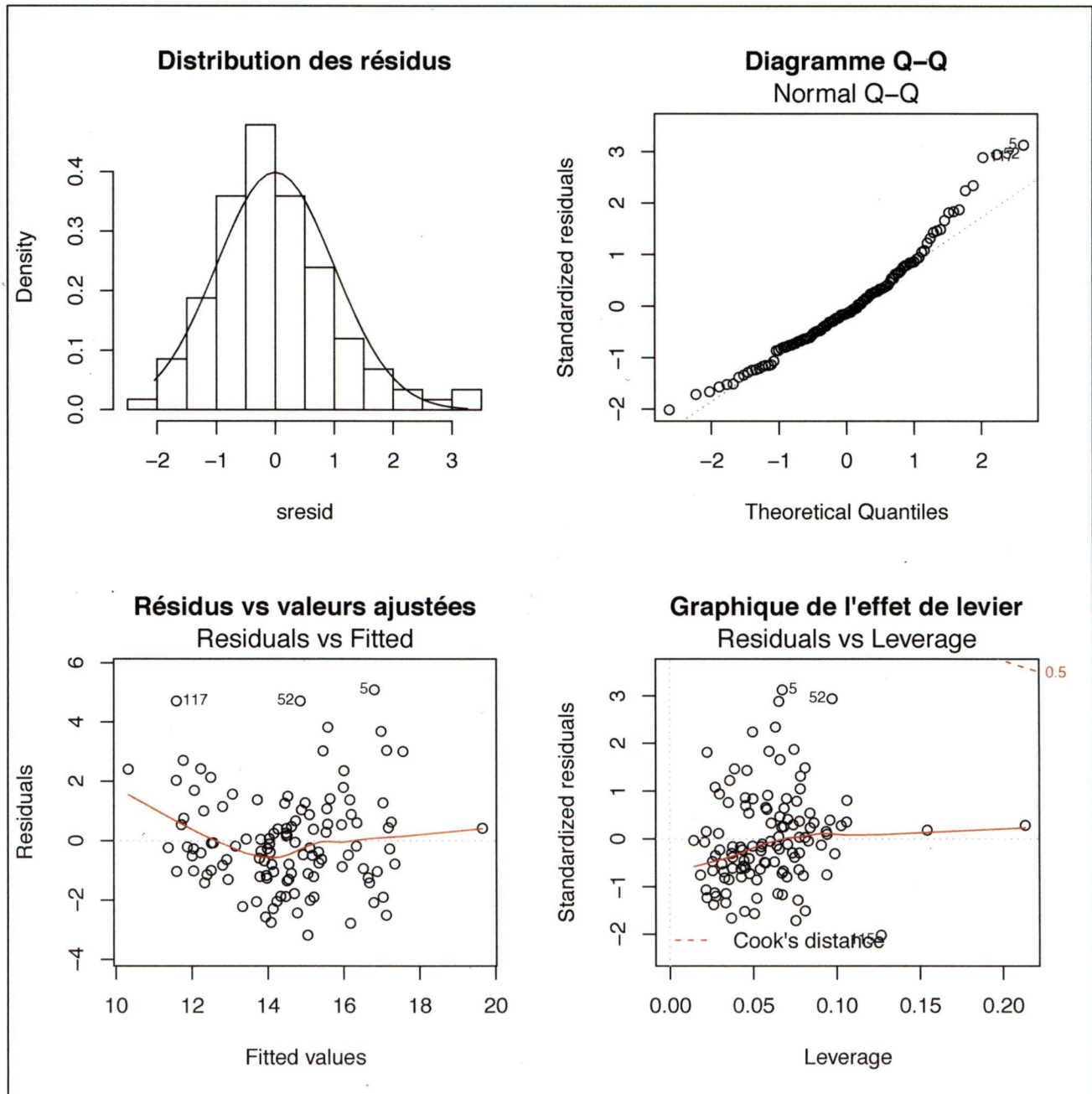
Pour le modèle 17, visuellement, l'ajustement semble bon. Le premier graphique montre une distribution des résidus studentisés qui s'approche d'une distribution normale. Le deuxième graphique est un graphique de type quantile-quantile, où les résidus standardisés sont plutôt près de la ligne droite (valeurs attendues) et montrent la linéarité de la relation. Dans le troisième graphique, les valeurs sont distribuées de manière plutôt aléatoire autour de zéro, sans patron apparent, ce qui atteste de l'homoscédasticité. Le quatrième graphique montre le point de levier et la distance de Cook, utilisée pour détecter les valeurs extrêmes (Tabachnick and Fidell, 1996).

Modèle 14 – Angle des microfibrilles (sapin baumier, placette)



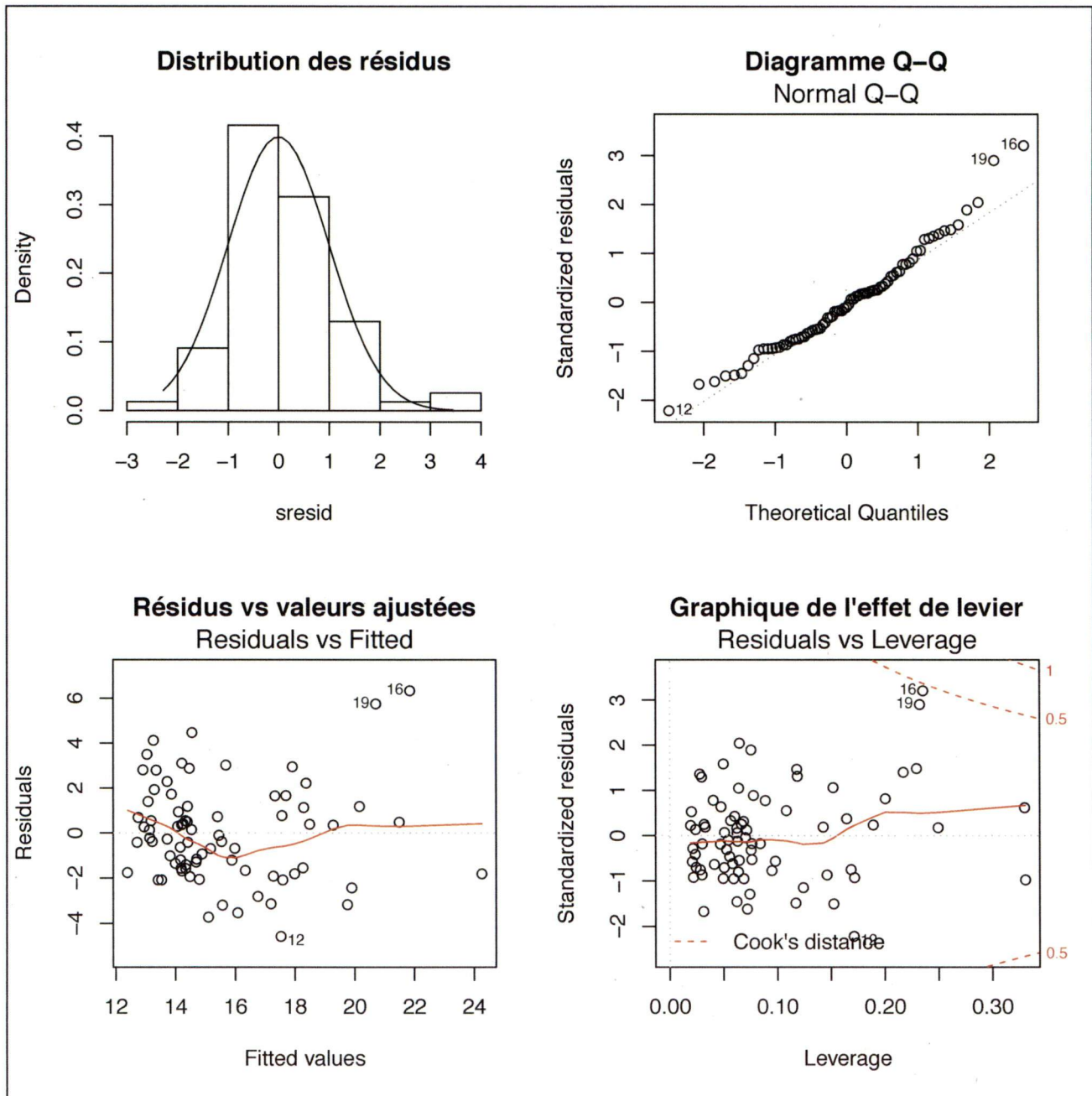
Pour le modèle 14, visuellement, l'ajustement semble bon. Le premier graphique montre une distribution des résidus studentisés qui s'approche d'une distribution normale. Le deuxième graphique est un graphique de type quantile-quantile, où les résidus standardisés sont plutôt près de la ligne droite (valeurs attendues) et montrent la linéarité de la relation. Dans le troisième graphique, les valeurs sont distribuées de manière aléatoire autour de zéro, sans patron apparent, ce qui atteste de l'homoscédasticité. Le quatrième graphique montre le point de levier et la distance de Cook, utilisée pour détecter les valeurs extrêmes (Tabachnick and Fidell, 1996).

Modèle 17 – Angle des microfibrilles (sapin baumier, placette)



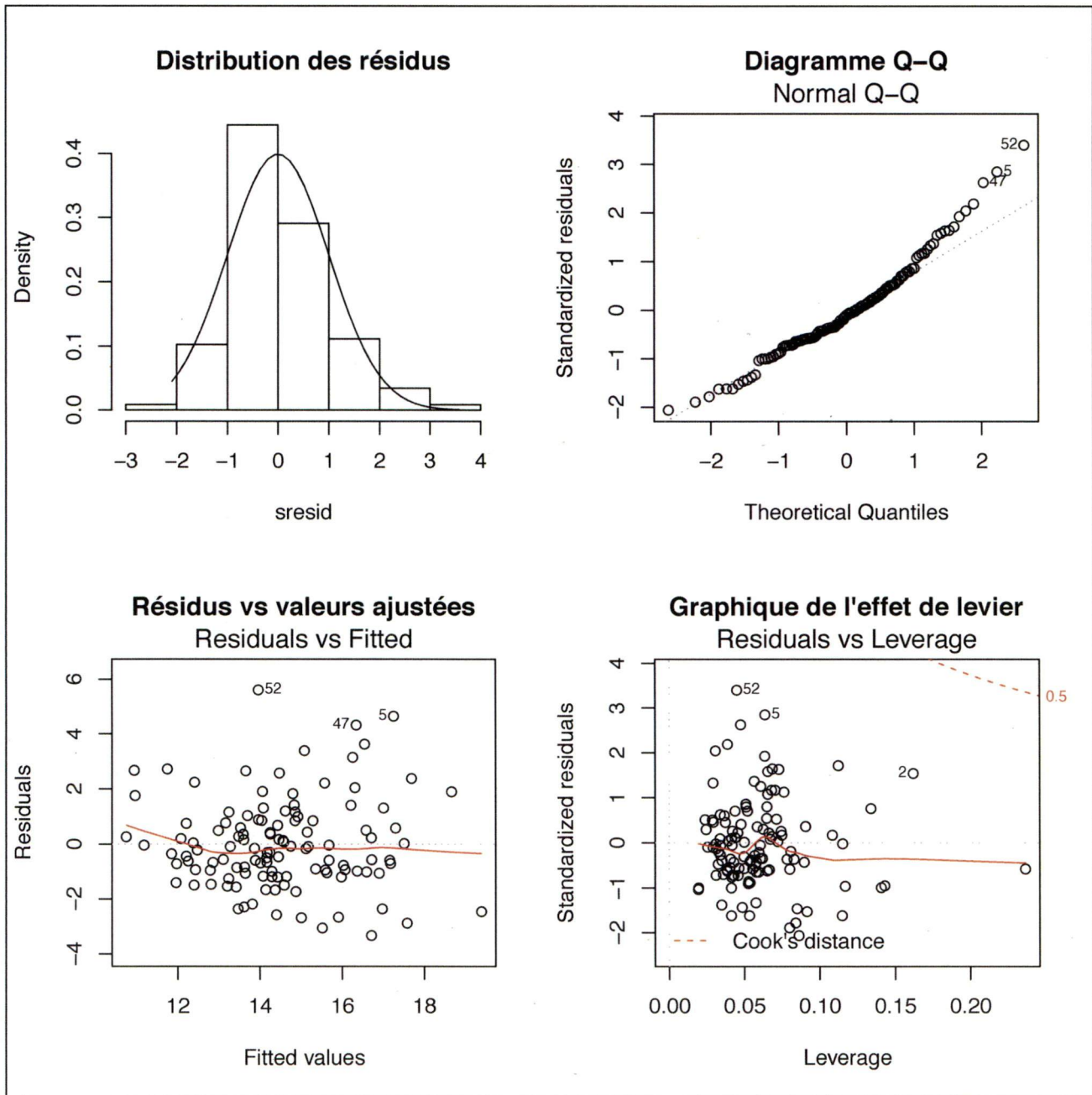
Pour le modèle 17, visuellement, l'ajustement semble bon. Le premier graphique montre une distribution des résidus studentisés qui s'approche d'une distribution normale. Le deuxième graphique est un graphique de type quantile-quantile, où les résidus standardisés sont plutôt près de la ligne droite (valeurs attendues) et montrent la linéarité de la relation. Dans le troisième graphique, les valeurs sont distribuées de manière aléatoire autour de zéro, sans patron apparent, ce qui atteste de l'homoscédasticité. Le quatrième graphique montre le point de levier et la distance de Cook, utilisée pour détecter les valeurs extrêmes (Tabachnick and Fidell, 1996).

Modèle 17 – Angle des microfibrilles (épinette noire, paysage)



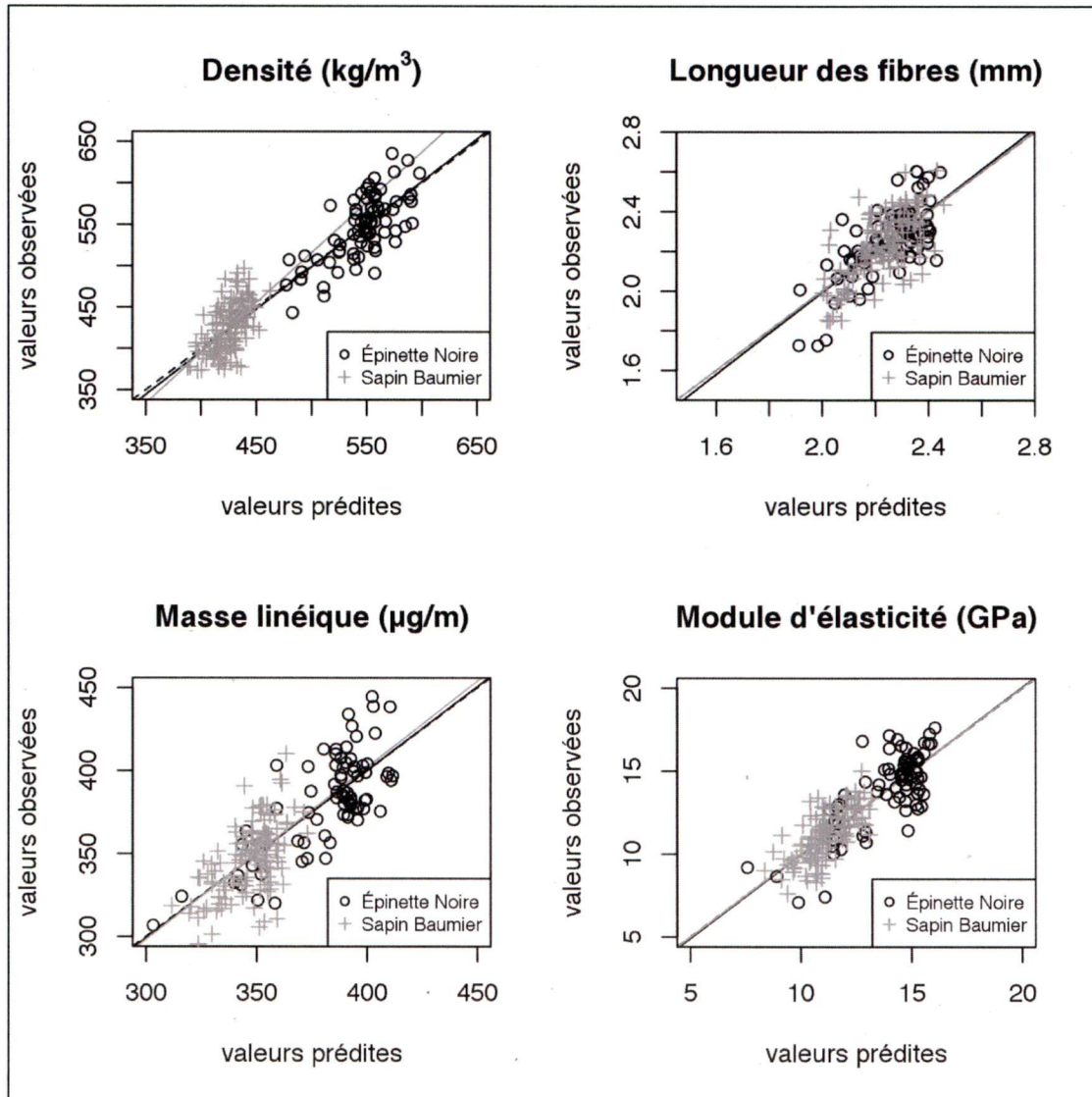
Pour le modèle 17, visuellement, l'ajustement semble bon. Le premier graphique montre une distribution des résidus studentisés qui s'approche d'une distribution normale. Le deuxième graphique est un graphique de type quantile-quantile, où les résidus standardisés sont assez près de la ligne droite (valeurs attendues) et montrent la linéarité de la relation. Dans le troisième graphique, les valeurs sont distribuées de manière plutôt aléatoire autour de zéro, sans patron apparent, ce qui atteste de l'homoscédasticité. Le quatrième graphique montre le point de levier et la distance de Cook, utilisée pour détecter les valeurs extrêmes (Tabachnick and Fidell, 1996).

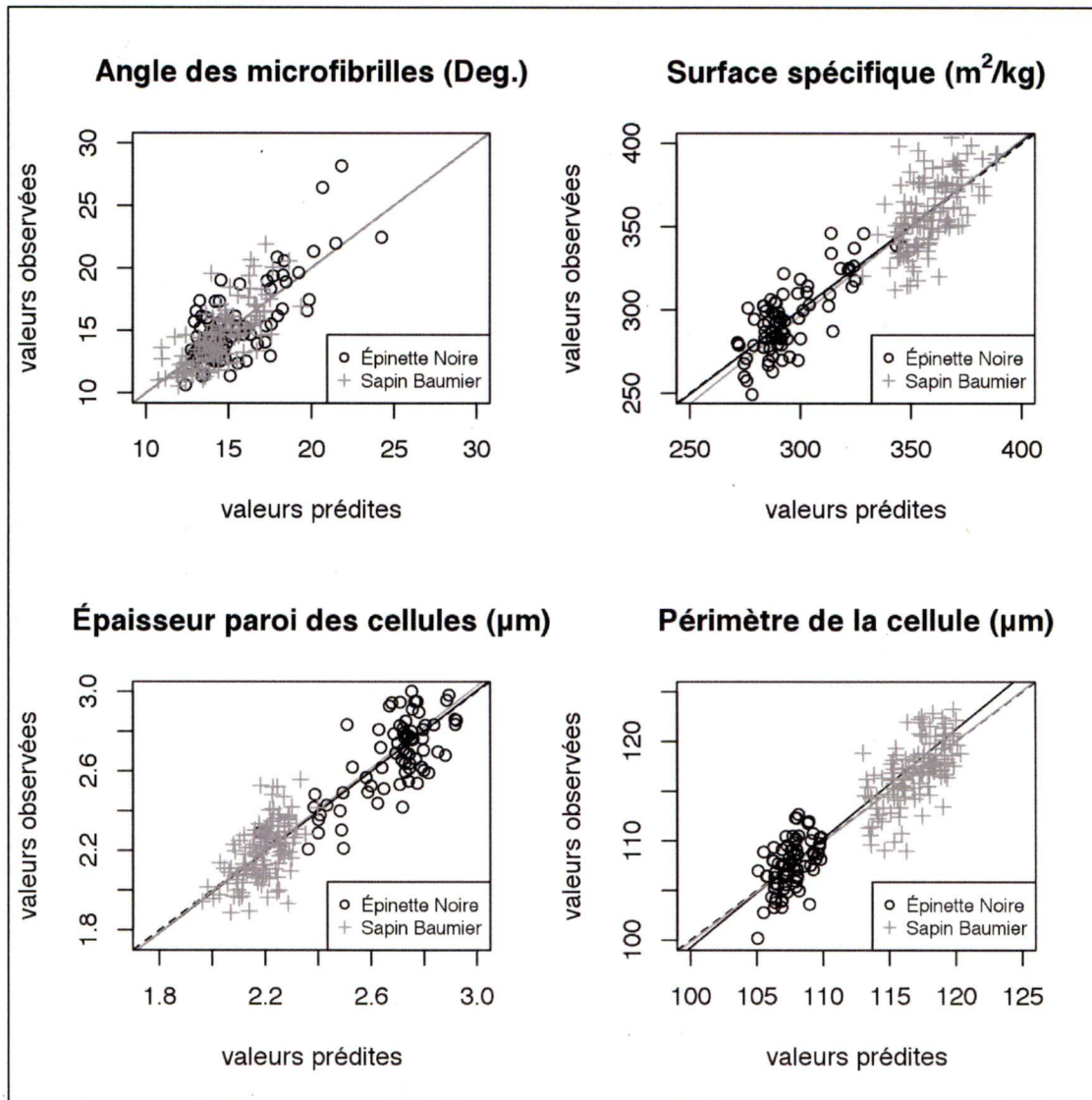
Modèle 14 – Angle des microfibrilles (sapin baumier, paysage)



Pour le modèle 14, de manière visuelle, l'ajustement semble bon. Le premier graphique montre une distribution des résidus studentisés qui est assez près d'une distribution normale. Le deuxième graphique est un graphique de type quantile-quantile, où les résidus standardisés sont plutôt près de la ligne droite (valeurs attendues) et montrent la linéarité de la relation. Dans le troisième graphique, les valeurs sont distribuées de manière aléatoire autour de zéro, sans patron apparent, ce qui atteste de l'homoscédasticité. Le quatrième graphique montre le point de levier et la distance de Cook, utilisée pour détecter les valeurs extrêmes (Tabachnick and Fidell, 1996).

**Annexe 7 – Valeurs observées vs prédites pour les attributs de la fibre de bois
(inférence multimodèle à l'échelle du paysage)**





Annexe 8 – Importance des variables explicatives pour les attributs présentés au chapitre 3 (échelle du paysage)

	Estimation du modèle pondérée	Erreur standard Inconditionnelle	Intervalle de confiance inconditionnel (95 %)
Densité - Épinette noire			
Classe d'âge	0,978871	0,180439 (0,184)	0,625218; 1,332525
Composition en espèces	0,330105	0,131936 (0,400)	0,071514; 0,588695
Éclaircie précommerciale	-30,26682	12,6613 (0,418)	-55,08251; -5,45112
Classe de hauteur	-3,968878	1,749153 (0,441)	-7,397154; -0,540601
Densité - Sapin baumier			
Classe de hauteur	-4,189411	1,165518 (0,278)	-6,473785; -1,905038
Précipitations annuelles	-0,05936	0,020625 (0,348)	-0,099784; -0,018936
Éclaircie précommerciale	-21,57759	8,028811 (0,372)	-37,31377; -5,84141
Classe d'âge	0,370146	0,138013 (0,373)	0,099645; 0,640647
Élévation	-0,058972	0,022522 (0,382)	-0,103115; -0,01483
Masse linéique - Épinette noire			
Composition en espèces	0,349365	0,095432 (0,273)	0,162321; 0,536408
Éclaircie précommerciale	-32,3818	9,211673 (0,284)	-50,43635; -14,32725
Classe d'âge	0,422072	0,120985(0,287)	0,184947; 0,659198
Masse linéique - Sapin baumier			
Classe d'âge	0,319973	0,092111 (0,288)	0,13944; 0,500506
Élévation	-0,055724	0,016282 (0,292)	-0,087637; -0,023812
Latitude	-5,658914	1,814351 (0,321)	-9,214978; -2,102851
Température moyenne (SC)	11,56916	3,92929 (0,340)	3,867896; 19,27043
Éclaircie précommerciale	-15,98781	5,459395 (0,342)	-26,68803; -5,287591
Longueur des fibres - Épinette noire			
Classe d'âge	0,002961	0,000802 (0,271)	0,001389; 0,004532
Composition en espèces	0,001659	0,00062 (0,374)	0,000444; 0,002874
Classe de hauteur	0,019999	0,007998 (0,400)	0,004323; 0,035676
Élévation	-0,000492	0,000219 (0,445)	-0,00092; -6,4e-05
Éclaircie précommerciale	-0,120042	0,057833(0,482)	-0,233392; -0,006692
Longueur des fibres - Sapin baumier			
Élévation	-0,000502	0,000106 (0,211)	-0,000709; -0,000294
Classe d'âge	0,00202	0,000539 (0,267)	0,000964; 0,003076
Latitude	-0,045612	0,012274 (0,270)	-0,069668; -0,021556
Classe de hauteur	0,0185	0,005619 (0,304)	0,007488; 0,029512
Éclaircie précommerciale	-0,100367	0,035267 (0,351)	-0,16949; -0,031244
Module d'élasticité - Épinette noire			
Composition en espèces	0,030345	0,007314 (0,241)	0,016009; 0,04468
Éclaircie précommerciale	-2,065889	0,682924 (0,331)	-3,404395; -0,727383
Classe d'âge	0,027441	0,009126 (0,333)	0,009554; 0,045328
Élévation	-0,005538	0,002573 (0,465)	-0,010581; -0,000495
Température moyenne (SC)	1,133752	0,508725 (0,449)	0,136669; 2,130835
Module d'élasticité - Sapin baumier			
Élévation	-0,004904	0,000934 (0,190)	-0,006735; -0,003073
Température moyenne (SC)	1,140837	0,235438 (0,206)	0,679387; 1,602288
Densité de couronne	0,030616	0,008191 (0,268)	0,014562; 0,046669
Éclaircie précommerciale	-0,980375	0,330562 (0,337)	-1,628264; -0,332485
Classe d'âge	0,010466	0,005151 (0,492)	0,00037; 0,020561

* Les variables explicatives sont en ordre décroissant de capacité prédictive.

** Les valeurs entre parenthèses représentent le ratio entre l'erreur standard et l'estimation du modèle pondérée

Annexe 9 – Résumé de la présentation orale faite lors du Carrefour Forêt Innovations

Modélisation des attributs de la fibre de bois, à partir de données d'inventaire forestier et environnementales : cas de la forêt boréale à Terre-Neuve

Auteurs : Émilie Lessard¹, Richard Fournier¹, Joan Luther², Marc J. Mazerolle³

1. Département de géomatique appliquée, Université de Sherbrooke, Sherbrooke (Québec), J1K 2R1

2. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Corner Brook (Terre-Neuve), A2H 6J3

3. Centre d'étude de la forêt, Département des sciences appliquées, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, (Québec), J9X 5E9

L'industrie forestière cherche à améliorer sa connaissance de la qualité de la fibre de bois des peuplements forestiers afin d'améliorer la planification et la gestion des opérations forestières. Cette amélioration passe par une meilleure connaissance des relations unissant les attributs de la fibre de bois et les variables environnementales. Cette étude vise à quantifier ces relations, à l'échelle de la placette, afin de développer des modèles prédictifs pour l'île de Terre-Neuve. Les attributs de fibre de bois ont été acquis grâce à l'analyse de carottes de bois par la procédure *SilviScan* (FPInnovations, Vancouver). Nous avons échantillonné 1430 arbres situés dans 71 placettes d'épinette noire et 80 de sapin baumier sélectionnées de façon stratifiée sur toute l'île de Terre-Neuve en fonction des structures existantes de peuplement. Les principales variables de la fibre de bois considérées incluaient, entre autres, la densité, l'angle des microfibrilles, et le modulus d'élasticité. Les variables environnementales explicatives utilisées comprenaient des données d'inventaire forestier, de température, de précipitation, et de site. Dans un premier temps, des méthodes d'exploration ont été utilisées pour établir les variables indépendantes importantes et éviter la colinéarité. Par la suite, un modèle prédictif a été sélectionné pour chacun des attributs à partir de modèles candidats, sur la base du critère d'information d'Akaike. Enfin, les modèles prédictifs obtenus ont été appliqués dans un SIG pour produire, à l'aide de méthodes d'interpolation spatiale, des cartes prédictives d'attributs de la fibre de bois pour l'île de Terre-Neuve.

Résultats présentés lors de la 8^e édition du Carrefour Forêt Innovations qui s'est tenu en octobre 2011 à Québec, dans le cadre du colloque : Collaboration entre le Centre d'étude de la forêt et ses partenaires de recherche : un atout à la formation de nos étudiants.